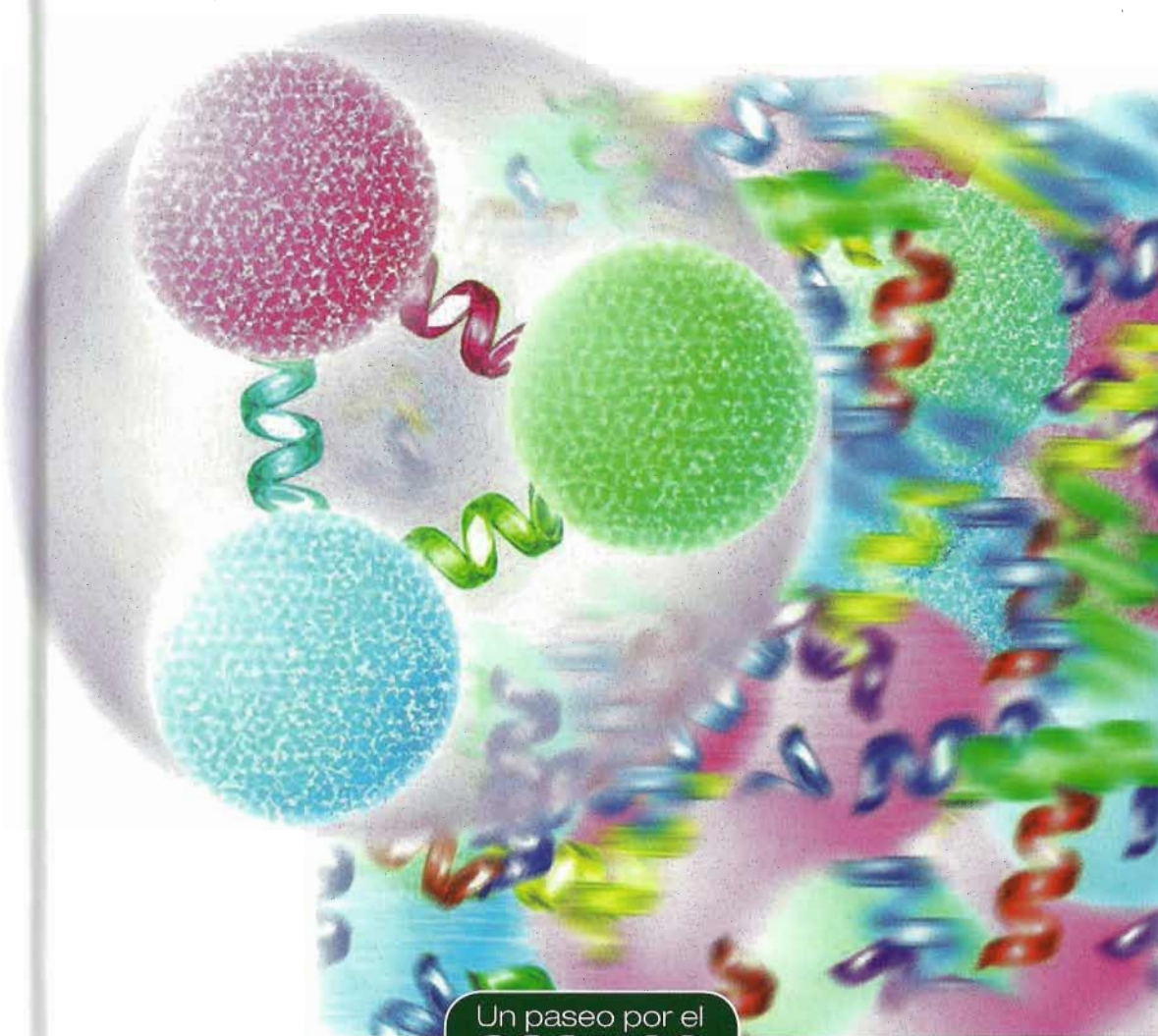


# Quarks y gluones

Las entrañas de las partículas  
elementales



Un paseo por el  
**COSMOS**

EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor y La Comunidad

Redigitalización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmoreau.blogspot.com/>

# Quarks y gluones

Las entrañas de las partículas  
elementales

RBA

*Imagen de cubierta:* Imagen artística de un nucleón, representado como una esfera transparente y constituido por tres quarks (bolas roja, verde y azul) unidos mediante gluones, con forma espiral.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© José Rodríguez-Quintero por el texto  
© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.  
© 2016, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Archivo RBA: 75i; Bettmann/Getty Images: 123b; Maximilien Brice/CERN: 123a; CERN/CMS Collection: 128; Spencer Grant/Age Fotostock: 83b; Jacopin/Age Fotostock: 136-137; Ad Meskens/Wikimedia Commons: 83a; Paul Preuss/Lawrence Berkeley National Laboratory/U.S. DoE: portada; Ward van Wanrooij/Wikimedia Commons: 75d; Wiso/Wikimedia Comuns: 140.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-8563-8  
Depósito legal: B-13301-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)  
Impreso en España - *Printed in Spain*

## SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	De Abdera a Manchester 15
CAPÍTULO 2	En el corazón del núcleo 35
CAPÍTULO 3	Luz, materia y simetría 65
CAPÍTULO 4	La fauna subnuclear y la vía óctuple 93
CAPÍTULO 5	Color, libertad y confinamiento 117
LECTURAS RECOMENDADAS	155
ÍNDICE	157

Imaginemos, retrocediendo hasta el siglo iv a.C., a un alumno cualquiera del Liceo de la Atenas clásica, cuna occidental del pensamiento y la filosofía. Nuestro alumno atiende a una lección de física, una de las iniciales, de las contenidas en el primero de los ocho libros que Aristóteles, fundador del Liceo, consagró a esta disciplina. Ante él, o seguramente paseando junto a él, una figura togada le instruye sobre el movimiento y sus causas, y sobre la materia sujeta a ese movimiento o, de forma más general, al cambio. El maestro, el mismo Aristóteles quizá, explica y critica el pensamiento de sus predecesores e introduce las líneas maestras de su sistema filosófico natural. En particular, explica el maestro, toda la materia perteneciente a la esfera comprendida por la órbita lunar se compone de cuatro elementos básicos, a saber: tierra, agua, aire y fuego. En esencia, según Aristóteles, la causa del movimiento de los cuerpos, o de su reposo, reside en la naturaleza primaria de los elementos que los componen. Aquellos cuya composición está dominada por la tierra tienden a caer, porque en el centro de la esfera terrestre se halla el lugar natural de dicho elemento. Del mismo modo, aquellos constituidos principalmente por aire o fuego buscan también su lugar natural en



esferas sucesivas que rodean a la esfera terrestre y tienden a subir. El alumno mira a su alrededor y abarca con su mirada cuanto le rodea: la complejidad de ese mundo natural que contempla se deriva de un puñado de ingredientes básicos, mezclados en diferente proporción. Todo, la enredadera sobre su cabeza, el suelo que pisa o la piedra del pórtico bajo el que pasea, se obtiene de los cuatro elementos básicos. La simplicidad está en la base de la complejidad. Y la primera sirve para explicar la segunda.

Como afirmara el filósofo y matemático Bertrand Russell, el historiador de la ciencia tiene que dedicar la necesaria atención a un trabajo, el de Aristóteles en su *Física*, que dominó absolutamente la ciencia hasta la aparición de Galileo, aunque difícilmente una sola de sus sentencias pueda considerarse aceptable a la luz de la ciencia moderna. El alumno del Liceo de Atenas estaría siendo instruido en una teoría errónea, capturando, sin embargo, un principio correcto: la estructura última de la naturaleza se explica a partir de unos pocos ingredientes básicos o elementos y de unas pocas leyes fundamentales, aunque quizá no tan sencillas ni, desde luego, tan intuitivas como el filósofo clásico quería creer. La historia de la física y, en parte, de la química es también la historia de la búsqueda de estos ingredientes básicos y de estas leyes fundamentales que proporcionan el andamiaje básico de la realidad natural. El objeto de este libro es contar esa historia para proporcionar al lector la visión precisa y rigurosa que la física moderna ofrece sobre la estructura última de la materia. De toda la

Nuestro alumno del siglo IV a.C., instruido de nuevo erróneamente durante sus últimas lecciones de física, habría levantado la cabeza y dirigido su mirada al cielo nocturno estrellado y habría creído que, más allá de la órbita lunar, reinaba la perfección inmóvil de un mundo distinto, compuesto por un quinto elemento, el éter o «quintaesencia». Sin embargo, Galileo y Newton nos enseñaron que nada es perfecto, ni inmóvil, más allá de la Luna y que las mismas leyes que rigen la tosca caída de una manzana en la Tierra gobiernan las majestuosas órbitas celestes y explican las observaciones planetarias de Kepler. Y, por supuesto, la materia es la misma también más allá de la órbita lunar.

Contemplemos, por ejemplo, la «fotografía» de nuestro universo que nos sirvió en 2003 el satélite WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*), lanzado en 2001 con la misión de realizar un mapa del cielo por medio del conocido como *fondo de radiación de microondas*. Esta radiación es un vestigio, luz fósil emitida hace unos 13 800 millones de años, solo unos 380 000 años después del origen del propio universo. La fotografía es, por tanto, una instantánea muy antigua de nuestro universo, de una etapa primordial del mismo, llamada «de recombinación», en la que las fuerzas eléctricas atractivas dominaron sobre la agitación térmica e hicieron de él un medio eléctricamente neutro en el que la luz entonces emitida pudo propagarse libremente, y así ha continuado hasta ser detectada hoy. Esta arcaica instantánea de nuestro universo es útil para nuestros propósitos, porque la imagen que proporciona y los cálculos nos muestran que, sin ningún género de dudas, el universo era entonces, y a gran escala sigue siendo hoy, muy homogéneo y uniforme. Es decir, igual en todas partes, compuesto del mismo modo, por la misma materia y la misma luz, en cualquier rincón. Toda esa materia estaba fundamentalmente constituida por solo tres especies químicas diferentes: tres cuartas partes de hidrógeno, casi una cuarta parte de helio y una pequeña parte, menos del 1%, de litio y de formas isotópicas diferentes de las especies anteriores. Toda esta materia, o sus ingredientes básicos, habría sido «cocinada» en unos pocos minutos, aproximadamente tres, después del origen del universo. ¿Qué son y qué rasgos caracterizan a estas especies químicas? ¿Qué distingue las diferentes variantes isotópicas de una especie dada? El progreso de la ciencia, de la física y la química a la sazón, desde los tiempos del Liceo de Atenas, ha traído consigo respuestas a estas interrogantes.

El descubrimiento del hidrógeno es atribuido a sir Henry Cavendish, quien lo identificó en 1766 y demostró en 1781 que su combustión producía agua, aunque el mismo Paracelso lo había aislado y descrito en el siglo XVI, sin reconocer en él un nuevo elemento, como resultado de la reacción de un metal y un ácido fuerte. El helio, en cambio, tuvo que esperar a ser aislado por sir William Ramsay en 1895, si bien había sido puesto de manifiesto



previamente, en 1868, por medio de un análisis espectroscópico de la luz proveniente de la corona solar durante un eclipse. En ambos casos, hablamos de dos gases. Respecto al primero, el hidrógeno, la mínima entidad con las mismas propiedades químicas del conjunto, denominada generalmente *molécula*, está formada por dos átomos de la especie hidrógeno. En cuanto al segundo, el helio, es un gas monoatómico, es decir, la molécula se compone de un único átomo de la especie helio.

Un *átomo* de un elemento dado es la entidad mínima de algo que pueda ser considerado como ese elemento. A pesar de que su nombre tiene la raíz en el vocablo griego *ἄτομος*, «que no se puede cortar», «indivisible», hoy sabemos que está compuesto por un núcleo que aloja partículas subnucleares, protones y neutrones, y por un número igual al de protones de otras partículas, denominadas electrones, que, de algún modo, orbitan en torno al núcleo. Sobre qué son, cómo se comportan y qué estructura confieren al átomo estas partículas hablaremos en el primer capítulo; baste ahora con anticipar que protón y electrón poseen carga eléctrica opuesta, positiva el primero y negativa el segundo, siendo el neutrón eléctricamente neutro. Lo que define a un elemento es el número de protones que aloja en su núcleo. Este número se conoce como *número atómico*. El hidrógeno posee un único protón; el helio, dos; el litio, tres.

Protón y neutrón tienen prácticamente la misma masa, siendo el electrón unas 2000 veces más ligero. En consecuencia, los neutrones que puedan acompañar a los protones del núcleo modificarán la masa del átomo, así como las propiedades del propio núcleo. Las diferentes variantes isotópicas de una especie dada difieren, precisamente, en el número de neutrones. La variedad más común del hidrógeno se caracteriza por un núcleo consistente en un único protón y ningún neutrón. Una segunda, y mucho más rara, variedad denominada deuterio consta de un núcleo formado por un protón y un neutrón. Existe también una tercera, muy inestable, denominada tritio, que incorpora un segundo neutrón al núcleo. En el caso del helio, su núcleo más común posee dos protones y dos neutrones; el conjunto de dos protones y un único neutrón forma también

un núcleo estable, aunque mucho más infrecuente en la naturaleza. Todos estos diferentes isótopos, incluyendo también las variedades más comunes del litio (con tres y cuatro neutrones), fueron sintetizados durante esos primeros tres minutos de vida de nuestro universo. Este proceso de síntesis se conoce como *nucleosíntesis primordial*. Unos 380 000 años después, las condiciones del universo, su enfriamiento por expansión, permitió que estos núcleos se rodearan del número adecuado de electrones y los mantuvieran de forma estable para formar átomos neutros.

Regresemos de nuevo a la fotografía del WMAP; hecha con «luz» en el rango de las microondas, muestra fluctuaciones de esa luz que nos hablan de la distribución de materia hace 13800 millones de años. Si fijamos nuestra atención en el punto adecuado, tendremos una «imagen» retrospectiva de la materia que, transcurridos algunos miles de millones de años, constituiría las primeras estrellas de las galaxias del conocido como Grupo Local, al que pertenece la Vía Láctea. Al cabo de unos 9000 millones de años, una pequeñísima parte de esa misma materia se condensaría en nuestro Sol y generaría el sistema solar al que pertenece la Tierra. ¿Toda la materia que nos rodea está constituida por ese pequeño puñado de elementos con sus diferentes isótopos? Ciertamente, no. La base biológica de nuestros cuerpos, y de todos los seres vivos (que conocemos), es un elemento químico, denominado carbono, cuyo número atómico es 6. Aloja, por tanto, seis protones en su núcleo y, en su variedad isotópica más frecuente, otros tantos neutrones. El 78% del aire atmosférico que respiramos está constituido por nitrógeno, con un protón más en su núcleo que el carbono (y un neutrón más si, de nuevo, hablamos del isótopo más extendido). El agua de nuestros océanos se compone de una molécula formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, que tiene número atómico 8. Y así podríamos continuar, por ejemplo, hasta el uranio que sirvió para la primera bomba atómica detonada en Hiroshima en 1945, y que cuenta con 92 protones en su núcleo. Y hasta el último elemento sintetizado artificialmente, el ununocio, cuyo núcleo aloja 118 protones.



¿Cuál es el origen de todos aquellos elementos no generados durante la nucleosíntesis primordial? Son el resultado de reacciones nucleares a partir de materia primigenia. Reacciones nucleares más o menos complejas que conducen a la transmutación de unos elementos en otros. Reacciones que, a partir de los tres primeros minutos, dejaron de producirse por el enfriamiento del universo, y que solo pudieron reactivarse, algunos miles de millones de años después, en el corazón de las primeras estrellas. Entonces sí se dieron las condiciones, en las estrellas adecuadas, para producir el resto de elementos más pesados. Las explosiones de estrellas de esta primera generación y el viento solar diseminaron estos núcleos pesados, enriqueciendo la materia interestelar que suministraría el material para una nueva hornada de estrellas, y para sistemas solares como el nuestro.

En suma, toda la materia que nos rodea es fruto de reacciones nucleares que se dieron a partir de ingredientes básicos «cocinados» mayormente en los primeros minutos del universo. Protones y neutrones, cuyas interacciones constituyen las fuerzas que rigen las reacciones nucleares, y electrones. ¿Son estos ingredientes elementales? ¿Constituyen las unidades últimas que dan estructura a la materia? De nuevo, la respuesta es negativa.

El estudio de las reacciones nucleares condujo a la introducción de dos nuevas fuerzas, nuclear fuerte y nuclear débil, que se sumaron a la gravedad y al electromagnetismo para cerrar el cuarteto de interacciones fundamentales. Indujo, además, a postular una nueva partícula subnuclear, unas siete veces más ligera que el protón, hoy denominada pion, que fue descubierta en 1947. No fue la última. Otras muchas partículas subnucleares, producidas por los cada vez más potentes aceleradores y que solo «vivían» brevísimas fracciones de segundo, fueron apareciendo en los cada vez más sofisticados sistemas de detección empleados por los físicos experimentales, complicando el panorama de la moderna física de partículas elementales hasta los años sesenta del siglo pasado. Estas partículas recibieron el nombre genérico de *hadrones*. La aplicación de las leyes de la mecánica cuántica, que había nacido con el siglo xx, y de ciertos principios organizadores basados en la simetría

(y que hacían uso de una rama de la matemática, desarrollada a partir de la segunda mitad del siglo xix, conocida como teoría de grupos) permitió poner orden en la aparentemente inextricable fauna de los hadrones. Además, sugirió que todos ellos, incluidos protón y neutrón, poseían una estructura interna que nacía de sus verdaderos constituyentes elementales, los *quarks*. Las fuerzas nucleares, fuerte y débil, en último término, eran ejercidas por y entre partículas más elementales que los protones y los neutrones, como eran los quarks, y los sistemas y reacciones nucleares debían ser el resultado del complicado efecto colectivo de estas fuerzas.

Finalmente, los quarks fueron detectados. La expresión de las fuerzas nucleares que los ligan se formalizó con el lenguaje de una teoría cuántica de campos, siguiendo las mismas pautas que la electrodinámica cuántica, la teoría cuántica microscópica para el electromagnetismo que fue exitosamente formulada a finales de la década de 1940. Y, del mismo modo que el fotón (excitación cuántica del campo electromagnético) mediaba en las interacciones electromagnéticas, otras partículas análogas eran las portadoras de las fuerzas nucleares fuerte y débil: los gluones y los bosones W y Z. El conocido como modelo estándar de la física de partículas emergió completo, siendo contrastado experimentalmente con una precisión jamás antes alcanzada. La estructura última de la materia, hasta donde hoy se sabe y se puede probar, había quedado finalmente revelada.

Este libro tiene como fin describir este apasionante viaje, desde el principio clásico de elementalidad en la descripción del mundo material hasta el mundo subnuclear regido por fuerzas nucleares que operan entre quarks.

## De Abdera a Mánchester

Desde Demócrito de Abdera en la Grecia presocrática hasta sir Ernest Rutherford, pionero del estudio moderno de la estructura de la materia en la Universidad de Mánchester, el pensamiento humano fue fabricando modelos para describir la realidad material que, a principios del siglo xx, alumbraron el concepto de núcleo atómico.



Abdera, situada en la costa de Tracia, en el tercio oriental de la actual Grecia y en la desembocadura del río Nestos, será el punto de partida del viaje intelectual que emprendemos. Fue una próspera polis griega, ora dominada por los persas, ora parte de la liga de Delos junto a Atenas, que se ganó un lugar principal en los libros de historia, entre otras cosas, por haber sido la cuna de dos pensadores clásicos ilustres: Leucipo y Demócrito. Ambos, aunque fundamentalmente el segundo, discípulo y continuador del primero, comparten la paternidad de la primera teoría atómica, habiendo desarrollado con ella una escuela de pensamiento conocida como «atomista», que puede considerarse el germen del materialismo moderno. Y, por supuesto, con su teoría atómica, intuyeron una verdad que solo sería reconquistada en el siglo XIX por la ciencia moderna: la naturaleza discreta de la materia.

Persiguiendo el principio organizador y racionalizador que permitiría explicar la variada fenomenología que observamos en la naturaleza mediante un puñado escaso de principios básicos, Demócrito y sus partidarios concibieron un mundo compuesto por entidades indivisibles, que denominaron átomos, en constante movimiento en el espacio, separados unos de otros

por el vacío, e interaccionando mecánicamente entre sí. Estos átomos, en número infinito, constituían el sustrato material de todo cuerpo, al ligarse de algún modo los unos con los otros

**Nada existe excepto átomos y espacio vacío; todo lo demás son opiniones.**

**DEMÓCRITO**

de múltiples maneras. Según las ideas de Demócrito, las propiedades de cualquier cuerpo resultaban, en última instancia, de los atributos de los átomos que lo formaban, los cuales diferían entre sí, precisamente, por sus propiedades físicas: tamaño,

forma, masa, dureza, etc. Los átomos de Demócrito eran, aparte de indivisibles, impenetrables y chocaban materialmente entre sí o podían «engancharse» dependiendo de una afinidad que se explicaba por su geometría o sus formas. Así, el mundo natural poseía un sustrato material último muy simple y, además, eterno: existían, siempre habían existido y siempre lo harían.

No obstante, más allá de la indivisibilidad de unas entidades que, en número infinito pero contable (es decir, que podían ser numeradas con los números naturales), constituían la materia, la otra gran intuición atomista residía en la aceptación del vacío como ausencia de materia. De hecho, lo último es consecuencia inevitable de lo primero, pero había sido tozudamente rechazado por filósofos clásicos de la talla de Parménides, quien se aferraba al siguiente silogismo: El vacío es nada; la nada no es; luego el vacío no puede ser, no puede existir. Al albur de esta suerte de razonamientos, Parménides acabó rechazando, incluso, la existencia del propio movimiento o, en sentido amplio, del cambio.

## LA RESURRECCIÓN DEL ÁTOMO

A la luz de la física moderna, la intuición de Demócrito sobre el carácter discreto de la materia, según Bertrand Russell simplemente afortunada, es esencialmente correcta. Lo es en el sentido corpuscular clásico (el de la física clásica anterior a la revolución cuántica de principios del siglo xx). Pero también lo es, aun-

que en un sentido radicalmente diferente, desde la perspectiva de la mecánica cuántica y de las teorías cuánticas de campos, que armonizan la primera con la teoría de la relatividad especial (que Albert Einstein formuló, también, a principios del siglo xx). El silogismo de Parménides quedó entonces desvirtuado: el vacío cuántico es, como veremos más adelante, mucho más que «nada», del mismo modo que el espacio y la geometría son mucho más que meros marcos referenciales en la dinámica que resultó de la teoría general de la relatividad.

Sin embargo, aunque el concepto de elemento y el de un mundo como el descrito por Aristóteles, compuesto únicamente por unos pocos elementos básicos mezclados en diferente proporción, persistieron desde sus orígenes en la Grecia clásica, a través de toda la Edad Media, hasta el nacimiento de la química moderna, el atomismo y la teoría atómica fueron perdiendo crédito y adeptos paulatinamente. La alquimia, como protociencia empírica, aunque no propiamente cuantitativa, y como disciplina críptica y hermética que perseguía la transmutación de unos elementos en otros, se desarrolló en Europa tras absorber la visión helénica del mundo material. De ese modo, los alquimistas occidentales, en su búsqueda de la piedra filosofal que reuniera y potenciara las propiedades de los cuatro elementos clásicos, conservaron y transmitieron esa visión aristotélica de la naturaleza. Conservaron y transmitieron la idea de que la complejidad en el mundo natural, con todas sus propiedades, se derivaba de unos pocos elementos sencillos. Y contribuyeron también al alumbramiento de la química.

Faltaba, no obstante, la conexión entre elemento y átomo. Los cuerpos se concebían compuestos por cantidades y proporciones de elementos que podían variar de manera tan gradual como fuera requerido. Las porciones de materia podían, formalmente, dividirse sucesivamente hasta el infinito. La evidencia nacida de la experiencia empírica de los alquimistas así lo dictaba. Además, en el siglo xvii, reputados físicos como Robert Boyle (quien puede ser considerado también, y al mismo tiempo, alquimista y precursor de la química) o Robert Hooke iniciaron los estudios de la teoría de los gases ideales (formados por partículas que



no interactúan entre sí), estableciendo la correlación entre sus magnitudes macroscópicas, como la temperatura, el volumen o la presión. Así nacía la termodinámica y, con ella, la física se ocupaba también de la materia concebida y tratada como un medio continuo. Algo análogo sucedía con la mecánica de fluidos, dirigida al estudio del movimiento de gases y líquidos, y desarrollada fundamentalmente a lo largo del siglo XVIII por medio de los trabajos de Daniel Bernoulli, Leonhard Euler y Joseph-Louis Lagrange.

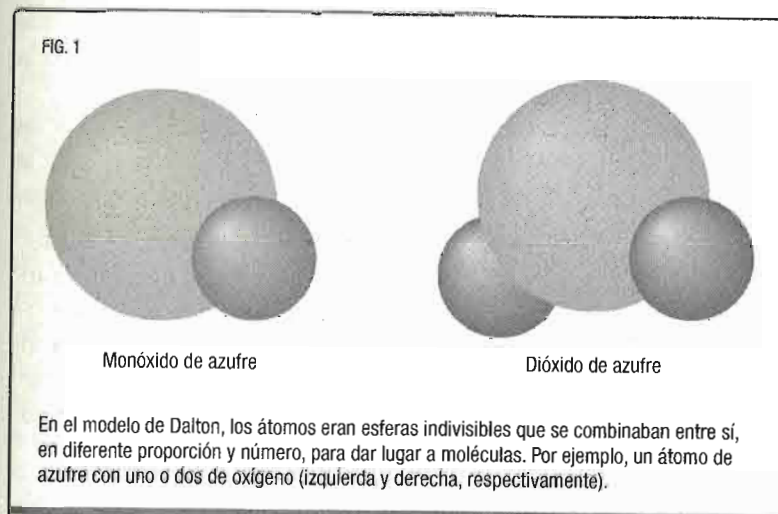
Sin embargo, el propio Daniel Bernoulli había avanzado, con la publicación de su libro *Hydrodynamica* en 1738, una explicación de la ley de Boyle para los gases, combinando la mecánica de Newton y la descripción estadística del sistema gaseoso compuesto por un número muy elevado de partículas materiales puntuales. De ese modo, sentaba las bases de la teoría cinética de los gases y, con ella, de la mecánica estadística que, siglo y medio más tarde y a raíz de los trabajos de Ludwig Boltzmann, Josiah Willard Gibbs o James Clerk Maxwell, tendería el puente definitivo desde la descripción termodinámica de los sistemas macroscópicos hasta las leyes dinámicas fundamentales que rigen para sus componentes microscópicos. No obstante, en el siglo XVIII, la teoría cinética de los gases de Bernoulli era poco más que un ejercicio heurístico que muy difícilmente podía dar sustento a la revolución desencadenada por la teoría atómica moderna.

Al tiempo que la física, como ciencia surgida de la revolución galileana del siglo XVII, desarrollaba la descripción de la materia como un medio continuo, la alquimia daba paso a la química moderna. A la luz de esta última, se revelaron como sustancias elementales metales extraídos y explotados desde la antigüedad, como el cobre, el oro, la plata, el cinc o el mercurio; otros metales, metaloides o semimetales como el bismuto y el antimonio (aislados y descritos por el célebre alquimista Basilius Valentinus) o el arsénico (por san Alberto Magno), y no metales como el hidrógeno (descrito por Paracelso), el oxígeno, el carbono o el azufre (identificados como elementos por el gran químico Antoine Lavoisier).

Con la química, además, se iniciaba el estudio sistemático y cuantitativo de las reacciones que combinaban estas sustancias

elementales para la formación de sustancias químicas compuestas. Como consecuencia, precisamente, de dichos estudios había surgido la conocida como *ley de las proporciones múltiples*, debida a John Dalton. Esta ley podía enunciarse como sigue: «Dados dos elementos A y B que se combinan para formar distintos compuestos, siendo fija la cantidad de A que entra a reaccionar y variable la de B, la proporción entre las distintas cantidades de B para cada compuesto viene expresada por un número entero» (figura 1).

La ley de las proporciones múltiples era una simple constatación empírica, pero al intentar justificarla, Dalton revolucionó el paradigma de la química y nuestra visión sobre la naturaleza de la materia. Con objeto de explicarla, en la primera década del siglo XIX, Dalton introdujo su teoría atómica, recuperando la vieja intuición (y la denominación) de Demócrito. La idea era sorprendentemente sencilla: cada especie química elemental debía estar formada por un número entero de entidades indivisibles e indestructibles, con una masa fija y característica para cada especie. Las especies químicas compuestas resultarían, entonces, de la unión de dos o más de estas entidades elementales, con distintas proporciones, pero siempre necesariamen-





te enteras. Así, por ejemplo, si un átomo de la especie A podía combinarse con uno o dos átomos de B para formar, respectivamente, los compuestos químicos AB y AB<sub>2</sub>, la cantidad de B que debía reaccionar con una cantidad fija de A para producir AB<sub>2</sub> sería siempre el doble de la necesaria para producir AB. La ley de las proporciones múltiples se derivaría, por tanto, de la naturaleza atómica de la materia. Y las reacciones químicas se explicarían, sencillamente, a partir de la reorganización de los átomos que constituían las especies reaccionantes, elementales o compuestas. La química, de este modo, rehabilitó empíricamente el concepto de átomo y la naturaleza discreta de la materia.

### EL ELECTRÓN Y EL «PUDIN DE PASAS»

La validez de la teoría de Dalton, entendida como una descripción efectiva de las reacciones químicas, persiste en la actualidad. No obstante, está muy lejos de proporcionar una descripción última de la estructura de la materia. Los átomos, aunque no podían dividirse ni ser destruidos en el curso de las reacciones químicas, resultaron no ser ni indestructibles ni indivisibles. Pero para que ello se pusiera de manifiesto, fue necesario que la física tomara el relevo de la química en la investigación de la estructura fundamental de la materia.

Por el momento, nuestro viaje intelectual hacia el corazón de la materia, iniciado en la griega Abdera, nos ha conducido, de la mano de Dalton, a las islas británicas. Concretamente a Mánchester, desde donde este publicó sus resultados y su revolucionaria interpretación de la ley de las proporciones múltiples. Nuestro siguiente destino, no muy lejos de Mánchester y poco menos de un siglo después, nos lleva a visitar el Laboratorio Cavendish de física experimental en la Universidad de Cambridge, donde trabajó el físico Joseph John Thomson, que demostró por primera vez que los átomos de Dalton podían, de algún modo, romperse. O, por lo menos, que era posible arrancarles algunos de los elementos o partículas que los constituían, partículas que fueron bautizadas

genéricamente como «subatómicas». Los átomos tenían, por tanto, estructura, y Thomson avanzó el primer modelo atómico que pretendía describirla.

Thomson había ganado una plaza de profesor en el Laboratorio Cavendish de Cambridge en 1884, cuando contaba 28 años, siendo ya entonces especialmente reconocido por su excepcional talento para las matemáticas. El interés del joven Thomson se dirigió hacia las aplicaciones de la teoría del campo electromagnético que, tan solo dos décadas antes, James Clerk Maxwell había condensado de forma brillante en un puñado de ecuaciones que, finalmente y con las aportaciones de Oliver Heaviside y Josiah Gibbs, quedaron reducidas a cuatro.

Un campo, en física, es un ente matemático que asocia a cada punto del espacio una cierta propiedad. El campo eléctrico en un punto dado, por ejemplo, expresa la fuerza que sentirá cada unidad de carga eléctrica positiva situada en dicho punto. Esa fuerza será el resultado de una o más cargas, situadas en otros puntos del espacio, que se dicen generadoras del campo eléctrico. Así, las fuerzas eléctricas, descritas por Coulomb como interacciones directas entre dos cargas, resultaban mediadas por un campo, el eléctrico, virtualmente ligado al espacio físico. Del mismo modo, las fuerzas magnéticas eran el resultado de la interacción de una carga en movimiento con un campo, el magnético, que era generado a su vez por otras cargas en movimiento (es decir, por corrientes eléctricas). A lo largo de todo el siglo XIX, a raíz de los trabajos experimentales de Jean-Christian Oersted, algunos otros reputados físicos como André-Marie Ampère, Joseph Henry o Michael Faraday pusieron de manifiesto, más allá de toda duda, la íntima conexión entre los fenómenos eléctricos y magnéticos. Maxwell completó la tarea, demostrando matemáticamente que los campos eléctrico y magnético eran manifestaciones parciales (o casos especiales) de una única entidad física: el campo electromagnético.

Las ecuaciones [de Maxwell] identifican con precisión las regularidades y las comprimen en un pequeño paquete matemático de inmensa potencia.

MURRAY GELL-MANN



Más adelante volcaremos nuestra atención sobre el campo electromagnético, ahora la reclaman los trabajos de Thomson, concretamente sus estudios de la interacción con el campo electromagnético de partículas o cuerpos cargados en movimiento.

**El electrón: puede que no sirva nunca a nadie para nada.**

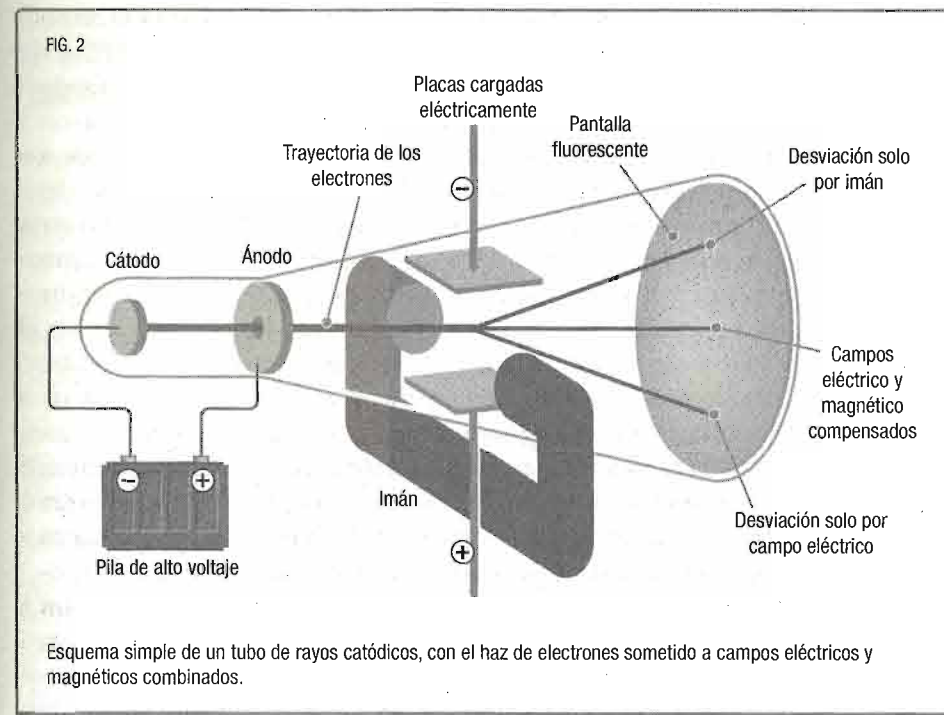
**J.J. THOMSON**

Así, se concentró en el estudio experimental de las propiedades de los rayos catódicos. Estos rayos habían sido descubiertos, en los años cincuenta del siglo XIX, por el físico alemán Julius Plücker, que los había observado en las lámparas de vacío con las que trabajaba. Posteriormente, fueron también observados y estudiados en tubos de vidrio que contenían aire, o algún otro gas, a baja presión y configurados con dos electrodos metálicos en su interior, entre los cuales se establecía un determinado voltaje. Recibieron su nombre, precisamente, por emanar del electrodo negativo, denominado *cátodo*. El tubo fue bautizado como tubo de Crookes, en honor del físico británico William Crookes, uno de los pioneros en la investigación de los rayos catódicos. Otros físicos perfeccionaron el tubo y realizaron distintos experimentos que contribuyeron a la comprensión del fenómeno, como el alemán Philipp von Lenard, quien recibió por ello el premio Nobel de Física en 1905. El tubo de Crookes es el precursor del tubo de rayos catódicos que, durante un siglo, constituyó la base de la tecnología de nuestros monitores y aparatos de televisión (figura 2).

Fueron, sin embargo, los meticulosos estudios experimentales de Thomson los que permitieron establecer la naturaleza de estos rayos. Descubrió que se propagaban en línea recta, en ausencia de campos eléctricos o magnéticos. Descubrió, además, que debían estar formados por partículas portadoras de carga eléctrica negativa, dado que se dirigían o eran desviadas hacia el electrodo positivo o ánodo del tubo, o también porque se desviaban bajo la acción de un imán, es decir, en presencia de un campo magnético, como se esperaría de un chorro o haz de partículas cargadas negativamente. Y, sobre todo, realizó diferentes estimaciones de la masa de estas partículas que le llevaron a

concluir que debían ser mucho más ligeras, unas mil 1000 veces más, que el más ligero de los átomos conocidos: el hidrógeno. Así, aunque únicamente pudo medir con suficiente precisión el cociente entre la masa y la carga de las partículas que componían los rayos catódicos (a partir de su deflexión por un campo magnético), pudo reconocer dichas partículas como uno de los «ladrillos» constituyentes del átomo. Había descubierto la partícula subatómica que hoy conocemos como *electrón*, cuya existencia postuló Thomson en 1897.

El átomo no era, pues, «elemental» en el sentido helénico del término. Ciertamente, cada elemento químico poseía un tipo particular de átomos, como había propuesto Dalton, pero no se trataba de entidades fundamentales sin ninguna estructura subyacente. Por el contrario, los átomos se componían de partículas subatómicas, con alguna suerte de organización interna. Organi-



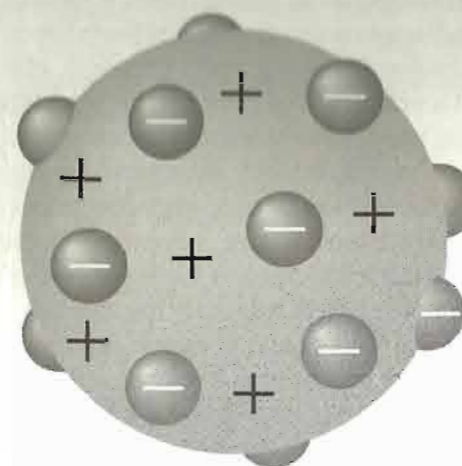
zación que, necesariamente, debía depender de las interacciones entre sus diferentes partículas constituyentes.

La materia es, en términos macroscópicos, eléctricamente neutra. Por consiguiente, los átomos que, por repetición, la constituyen también deben serlo. La consecuencia inmediata era que, si los electrones poseían carga negativa, el átomo debía compensar la carga de los electrones con una carga positiva equivalente. Además, la carga positiva posibilitaría la estabilización electrostática del átomo, al introducir fuerzas atractivas entre cargas de distinto signo. Bajo estas premisas, Thomson ideó en 1904 un primer y sencillo modelo para el átomo, presentándolo como una esfera maciza, con la carga eléctrica positiva distribuida uniformemente, en la que se incrustaban los electrones, como las pasas en un pudín, en número tal que compensaban la carga positiva. Esta última imagen, ilustrativa de la estructura del átomo propuesta por Thomson, determinó que fuera bautizado como «modelo del pudín de pasas» (figura 3). Thomson recibió el premio Nobel en 1906 «en reconocimiento al gran mérito de sus investigaciones teóricas y experimentales sobre la conducción de la electricidad a través de gases».

Según Thomson, los electrones podían ser arrancados de los átomos por colisiones entre estos, como las producidas por fricción material o por agitación térmica. Este proceso se conocería más tarde como *ionización* y su resultado sería un átomo cargado positivamente o catión (ion positivo), por el defecto de electrones. En el tubo de Crookes, el campo eléctrico producido por el voltaje entre los electrodos ionizaría el gas residual en su interior, y conduciría los electrones arrancados desde el cátodo hasta el ánodo. Los electrones producidos por ionización podían ser también capturados por un átomo neutro, generando un exceso de carga negativa y formando un anión (ion negativo). Así, el modelo de Thomson explicaba la fenomenología de los rayos catódicos y mucha de la relacionada con los procesos químicos iónicos.

La naturaleza de la nube o esfera de carga positiva que alojaba a los electrones era, no obstante, un misterio. El siguiente paso hacia el corazón de la materia tenía necesariamente que ir en caminado a la investigación de esta enigmática carga positiva.

Fig. 3



Representación esquemática del modelo de Thomson, en el que los electrones se incrustan en una esfera cargada homogéneamente con carga positiva.

Y sería el propio Thomson quien inspiraría a un joven neozelandés, que disfrutaba de una beca de estudios de posgrado en el Laboratorio Cavendish de Cambridge entre 1895 y 1898, para que le tomara el relevo. El alumno aventajado de Thomson se llamaba Ernest Rutherford y sus sobresalientes descubrimientos en el campo de la estructura atómica le valieron ser reconocido como el padre de la física nuclear.

## DE CAMBRIDGE A MÁNCHESTER Y AL CORAZÓN DEL ÁTOMO

Ernest Rutherford fue algo más que un espectador privilegiado del descubrimiento del electrón por Thomson, en 1897. Además, estando todavía en Cambridge, se interesó por la radiactividad espontánea que Antoine Henri Becquerel había descubierto estudiando sales de uranio, hallazgo que había publicado en 1896. Posteriormente, cuando ocupaba una plaza de profesor en la



Universidad McGill en Montreal (Canadá), intensificó sus investigaciones en el campo de la radiactividad e identificó dos tipos diferentes de radiaciones asociadas a los fenómenos radiactivos. Las denominó *radiación alfa* y *radiación beta*, como se las conoce aún hoy. La primera de ellas acabaría convirtiéndose en la «luz» con la que escrutaría el mundo subatómico. Rutherford, junto al químico Frederick Soddy, demostró que la radiactividad implicaba la transmutación de unas especies químicas en otras, avanzando una teoría para lo que él llamó «desintegración atómica» (hoy desintegración nuclear), que explicaba los fenómenos radiactivos a partir de la rotura de los átomos.

Thomson había probado que el átomo podía perder electrones, o también ganarlos, ionizándose. Sin embargo, la especie química no mutaba. Su alumno Rutherford, en cambio, sugirió que el átomo podía romperse de algún modo más radical. El resultado era un cambio de elemento, la transmutación del átomo de una especie a otra. El viejo sueño de los alquimistas se tornaba científicamente posible.

En 1907, Rutherford regresó al Reino Unido, a la Universidad de Mánchester. Desde allí, entre 1907 y 1919, cambiaría el paradigma de la física experimental en las fronteras de nuestro conocimiento sobre la estructura de la materia. Había descubierto que los átomos podían romperse. ¿Qué mejor manera podía haber para estudiar la estructura interna de los átomos que romperlos, o intentar romperlos, y observar el resultado? Recién llegado a Mánchester, Rutherford continuó sus experimentos con la radiación alfa. Desarrolló, junto a Hans Geiger, las pantallas de sulfuro de cinc que, expuestas a la radiación alfa, dejaban ver destellos o centelleos que resultaban del impacto sobre ellas de cada una de las partículas que componían la radiación. Dichas partículas pasaron a llamarse *partículas alfa*. Estas pantallas de centelleo permitían contar el número de partículas incidentes y, por tanto, ofrecían una estimación del flujo de la radiación, es decir, del número de partículas que, por segundo, atraviesan una superficie dada. Pero ¿qué eran esas partículas alfa? Su recuento con las pantallas de centelleo y la medida de la carga total que inducían permitió a Rutherford establecer que cada una de ellas

poseía una carga eléctrica positiva que doblaba la del electrón. Además, en un ingenioso experimento, Rutherford y un colaborador, Thomas Royds, consiguieron acumular estas partículas en un tubo o cámara de evacuación y hallaron que poseían un espectro atómico coincidente con el del átomo de helio. Rutherford concluyó entonces que las partículas alfa eran átomos de helio doblemente ionizados, es decir, que habían perdido dos electrones, explicando así su carga. Intuyó, además, que estaban completamente ionizados, es decir, que dos eran todos los electrones contenidos en el átomo de helio. Por tanto, la partícula alfa no podía ser otra cosa que la esfera o nube de carga positiva sugerida por Thomson para el átomo de helio.

Rutherford había encontrado el proyectil ideal con el que bombardear otros átomos y escudriñar el resultado. Así, bajo su dirección e inspiración, sus estudiantes Hans Geiger y Ernest Marsden planificaron y desarrollaron, entre 1908 y 1913, una serie clave de experimentos que, finalmente, invalidaron el modelo atómico de Thomson y llevaron a Rutherford a proponer su propio modelo. De manera genérica, se conoce a esta serie de experimentos como experimento Geiger-Marsden o experimento de la lámina de oro de Rutherford. Consistió esencialmente en hacer incidir un «proyectil», las partículas alfa de un chorro o haz convenientemente dirigido, sobre un blanco, átomos de oro dispuestos en una lámina delgada, y estudiar la desviación sufrida por el proyectil por medio de detectores, pantallas de centelleo, que determinarían el flujo de partículas desviado con diferentes ángulos, medidos respecto a la dirección de incidencia del haz (figura 4). Fue un experimento de *scattering* o dispersión (elástica, en este caso, porque no se romperían ni proyectil ni blanco), el primero de muchos que se sucederían y que, básicamente, siguen repitiéndose en nuestros días, paradigma de la física nuclear experimental que, precisamente, nació con él.

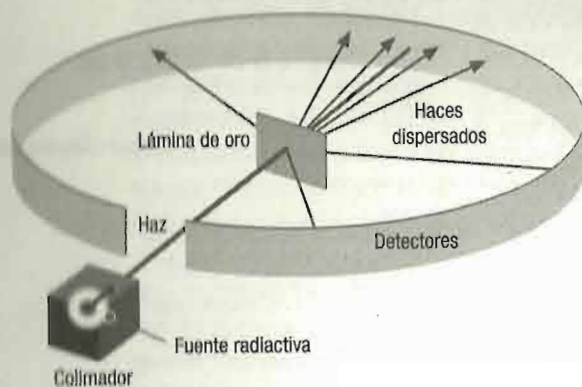
El resultado del célebre experimento fue totalmente inesperado, juzgado desde la idea consagrada por el modelo de Thomson.

Toda ciencia o es física o es  
filatelia.

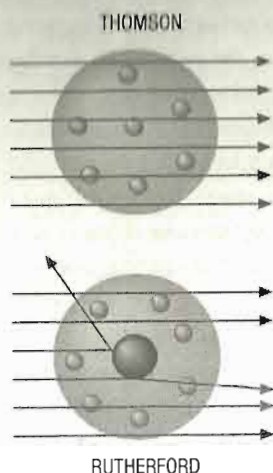
ERNEST RUTHERFORD



FIG. 4



Diseño experimental básico del experimento de Geiger y Marsden. Una fuente radiactiva genera un haz dirigido por un colimador que lo hace incidir sobre una lámina de oro y es dispersado. Los núcleos de oro provocan las desviaciones de los haces dispersados, que son recogidos por los detectores. Como puede verse en el esquema de la derecha, el modelo de Thomson no puede explicar desviaciones importantes dado que la distribución de la carga y la masa por toda la esfera atómica diluye el efecto de dispersión. Del análisis de las desviaciones obtenidas, Rutherford infirió la existencia del núcleo, que concentra toda la carga positiva y casi toda la masa del átomo, y cuyo radio es 100 000 veces menor que el del propio átomo.



Gran parte de las partículas alfa se desviaban solo ligeramente y eran identificadas por detectores situados en las regiones hacia las que apuntaba el haz. Una pequeña fracción de ellas, sin embargo, fue recogida por detectores situados por detrás de la fuente emisora del haz. ¡Dichas partículas habían rebotado en los átomos de oro de la lámina! No obstante, si el modelo de Thomson para la estructura del átomo era correcto, la carga positiva estaba uniformemente repartida en una esfera del tamaño del átomo. En esas condiciones, las fuerzas eléctricas repulsivas, ejercidas entre las partículas alfa y la carga positiva distribuida por el átomo, no serían lo suficientemente intensas y servirían solo para explicar una desviación ligera. Mucho menos podría imputarse el efecto a los electrones, con una masa aproximada-

mente 8000 veces más pequeña que la partícula alfa. El resultado del experimento era tan insólito como si, en palabras del propio Rutherford, «se disparase un proyectil de 15 pulgadas a una lámina de papel tisú y rebotase hacia atrás».

Rutherford analizó los resultados y, en 1911, publicó sus conclusiones en un artículo titulado «La dispersión de partículas alfa y beta por la materia y la estructura del átomo». La explicación que ofreció fue sencilla pero revolucionaria. La intensidad de las fuerzas eléctricas necesaria para repeler las partículas alfa hacia atrás implicaba una distribución de carga muy diferente a la sugerida por Thomson: la carga positiva y casi toda la masa del átomo debían estar concentradas en una región espacial muy reducida del átomo, un núcleo masivo y cargado positivamente en torno al cual orbitaban los electrones, ligados a él por fuerzas eléctricas. Estas eran, en esencia, las premisas básicas del modelo atómico de Rutherford, que describía una nueva estructura atómica en consonancia con los sorprendentes resultados del experimento de Geiger-Marsden. El modelo alojaba la carga positiva del átomo en un núcleo que, como sabemos hoy, posee un radio 100 000 veces más pequeño que el propio átomo.

El significado de «tamaño» en el mundo microscópico del átomo y sus constituyentes subatómicos necesitará una posterior revisión a la luz de las leyes de la mecánica cuántica; no obstante, es oportuno detenerse ahora y reflexionar sobre las dimensiones sugeridas por el naciente modelo de Rutherford. Imaginemos, para asimilar las proporciones, que el átomo abarcara la esfera completa del planeta Tierra. En tal caso, ¡el núcleo sería una minúscula esferita de, aproximadamente, 64 m de radio! Los electrones orbitarían en torno a ese diminuto núcleo de algún modo, estableciendo las dimensiones atómicas. La materia es, según el modelo de Rutherford, vacío entre minúsculas partículas que generan intensos campos electromagnéticos en sus inmediaciones atómicas. Las mismas fuerzas electromagnéticas, de manera residual, explican las fuerzas interatómicas e intermoleculares, estableciendo las distancias promedio entre los átomos en las redes cristalinas o metálicas, por ejemplo, o el comportamiento de los fluidos. Vacío, una vez más, entre átomos o moléculas,



donde toda estructura resulta de la acción de las fuerzas electromagnéticas generadas, en última instancia, por electrones y diminutos núcleos. La materia era, desde luego, discreta, como Demócrito había intuido.

El trabajo de Rutherford de 1911 había redefinido la estructura atómica, confinando la nube de carga positiva en un núcleo minúsculo, pero no había avanzado en el escrutinio de la naturaleza

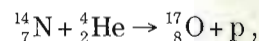
Si tu experimento necesita estadística, deberías haber hecho un experimento mejor.

ERNEST RUTHERFORD

de dicha carga positiva. De hecho, el experimento de Geiger-Marsden ni siquiera permitía concluir que la carga del núcleo fuera positiva. Fueron experimentos posteriores, realizados entre 1913 y 1919 bombardeando con partículas alfa diferentes gases, como

hidrógeno, nitrógeno y oxígeno, los que permitieron a Rutherford establecer que el núcleo estaba cargado positivamente. Y algo más: Rutherford descubrió que bombardeando átomos de hidrógeno con partículas alfa obtenía lo que parecía ser el núcleo de ese átomo, el átomo más ligero. De igual forma, al bombardear átomos de nitrógeno, también obtenía, como subproducto de las colisiones, el mismo núcleo de hidrógeno. De algún modo, las partículas alfa parecían arrancar al núcleo de nitrógeno un núcleo de hidrógeno. La acertada conclusión de Rutherford fue que el núcleo de hidrógeno, el más ligero de todos los núcleos, debía ser un elemento constituyente de las partículas alfa (núcleos de helio), del núcleo de nitrógeno y de cualquier otro núcleo en la naturaleza. El núcleo de hidrógeno era una partícula subatómica, con carga positiva e igual en magnitud a la del electrón, que debía formar parte de todos los núcleos. Rutherford la presentó al mundo, en 1920, y fue bautizada con el nombre de *protón*.

El experimento de Rutherford de 1919, en el que bombardeó nitrógeno con partículas alfa, puede considerarse como la primera reacción nuclear inducida, no espontánea (como las que causan la radiactividad natural). Empleando una notación moderna, dicha reacción se escribiría como:



## DESINTEGRACIONES NUCLEARES

Las reacciones nucleares conducen, en general, a una reorganización de las partículas subatómicas que componen el núcleo, del mismo modo que las reacciones químicas suponen una reorganización de los átomos que constituyen los compuestos reaccionantes. Pueden ser espontáneas o inducidas; en el primer caso son la causa de la radiactividad natural.

### Radiación alfa

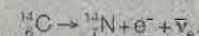
Los núcleos que se desintegran por radiación alfa se denominan emisores alfa, como el polonio-210:



En toda ecuación nuclear se indica el número de protones de cada núcleo con un subíndice, y la suma de protones y neutrones con un superíndice. En la reacción anterior, puede observarse que el número de protones antes y después de la reacción es 84, y el de neutrones es  $210 - 84 = 126$ .

### Radiación beta

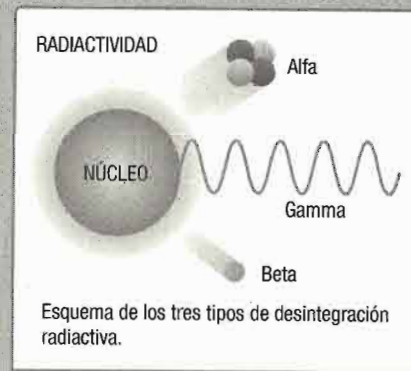
Los núcleos que se desintegran por radiación beta se denominan emisores beta, como el carbono-14:



En las reacciones beta, además de reorganizarse, las partículas subatómicas se transforman unas en otras. En el ejemplo anterior, el núcleo emite un electrón,  $\text{e}^-$ , transformando uno de sus neutrones en un protón. También se produce la emisión de una partícula, llamada neutrino,  $\bar{\nu}_e$ . El resultado es la conservación de la suma de neutrones y protones, 14 en este caso, antes y después de la reacción. También debe conservarse la carga eléctrica: la de seis protones, antes de la reacción, y la de siete protones menos la de un electrón, después. También puede emitirse un positrón, la antipartícula del electrón cargada positivamente, en cuyo caso un protón se transformaría en un neutrón.

### Radiación gamma

Hay otras formas de radiactividad, como la radiación gamma, que implica la emisión de luz muy energética, o reacciones espontáneas, como la fisión nuclear, que suponen la división del núcleo en dos fracciones más pequeñas.



donde  $p$  representa al protón y N, He y O son los símbolos químicos del nitrógeno, el helio y el oxígeno. El subíndice que acompaña a cada símbolo, denominado *número atómico*, representa el número de protones del núcleo: dos para el helio (o partícula alfa), siete para el nitrógeno y ocho para el oxígeno. ¿Qué representa el superíndice? Una vez más, Rutherford anticiparía la respuesta. El núcleo atómico estaba ocupado, también, por una segunda partícula. El genial neozelandés la bautizaría como *neutrón* y fue descubierto en 1932 por uno de sus colaboradores, James Chadwick. Ese segundo índice, denominado *número másico*, representa la suma de protones y neutrones. Chadwick recibió el premio Nobel de Física en 1935 por su descubrimiento; Rutherford había recibido el de Química en 1908, por sus trabajos sobre la desintegración nuclear.

## En el corazón del núcleo

Las reacciones entre núcleos y la estructura de los mismos dependen de las fuerzas entre las partículas subnucleares que los componen, neutrones y protones. Estas fuerzas pueden describirse a partir de una nueva partícula, el pion, postulada por Hideki Yukawa en 1935.



El átomo de hidrógeno modelado por Rutherford constaba de un protón, alojado en una región atómica central o núcleo con un radio aproximado de una milbillonésima parte de un metro, y de un electrón que giraba en torno a ese único protón describiendo una órbita con un radio medio aproximado de una diez mil millonésima parte de un metro. El protón era unas 2000 veces más pesado que el electrón, concentrándose el 99,95% de la masa atómica, por tanto, en el núcleo. Protón y electrón poseían la misma carga eléctrica, positiva el protón y negativa el electrón. En consecuencia, la interacción eléctrica atractiva entre ambos, es decir, el campo electromagnético creado por ambas cargas, era el responsable de esa configuración orbital, a imagen y semejanza microscópica de la del sistema solar, gobernada por el campo gravitatorio. En el caso del átomo de helio, eran dos los electrones que orbitaban, y también dos los protones alojados en el núcleo. Sin embargo, la masa del núcleo de helio (la partícula alfa) era de unas cuatro veces la del protón, y los desajustes aumentaban al avanzar en la tabla periódica que ordena las especies químicas. Por ejemplo, el carbono que Rutherford había bombardeado con partículas alfa para liberar al protón de-

bía contar con seis electrones orbitando y seis protones en el núcleo, pero su masa, y, por tanto, la de su núcleo, era aproximadamente igual a 12 veces la del protón.

Ese no era el único inconveniente que emergía de la estructura atómica derivada del modelo de Rutherford. El núcleo del átomo de carbono, con seis protones, o el del nitrógeno, con siete, seguían concentrando casi toda la masa y, sobre todo, la carga eléctrica positiva en una región con un diámetro unas 100 000 veces más pequeño que el propio átomo. ¿Por qué? La atracción eléctrica entre protones y electrones parecía responsable de mantener ligados a estos últimos, describiendo órbitas en torno al núcleo. No obstante, la repulsión eléctrica entre protones, todos cargados positivamente, no los dispersaba. Muy al contrario, fueran los dos del helio o los seis y siete del carbono y el nitrógeno, respectivamente, permanecían «apretados» en el núcleo. Recuperando la analogía del sistema solar, en un átomo del tamaño del planeta Tierra, los protones, empujados a separarse miles de kilómetros por acción de la repulsión eléctrica (de una intensidad equivalente a la atracción que capturaba a los electrones), se hallarían empero a escasos 60 metros los unos de los otros. ¿Cómo era posible? ¿Por qué las fuerzas eléctricas que parecían gobernar la estructura orbital atómica resultaban no ser efectivas en el núcleo?

Aunque la distribución de la carga eléctrica en el átomo era una evidencia empírica, que resultaba del experimento de Geiger-Marsden, desde el punto de vista dinámico el modelo de Rutherford parecía incompleto. Y aún peor, no solo el núcleo parecía ser eléctricamente inestable, también las órbitas electrónicas lo eran. La razón puede explicarse fácilmente como sigue. Una consecuencia inmediata de la unificación del campo electromagnético por Maxwell es que toda carga eléctrica que sigue una trayectoria acelerada tiene que emitir radiación electromagnética, es decir, luz (aunque no necesariamente en el rango visible del espectro). Cualquier trayectoria no rectilínea implica una aceleración, como sucede para una órbita cerrada (las fuerzas atractivas aceleran la partícula, cambiando permanentemente su dirección de movimiento). Por consiguiente, en

virtud de las leyes del electromagnetismo, el electrón radiaría (y perdería) energía al girar en torno al núcleo, «cayendo» paulatinamente hacia él. La órbita de Rutherford no sería, pues, estable, y el átomo de hidrógeno tampoco lo sería. Ningún átomo podría serlo.

El propio Rutherford ofreció algunas claves para resolver el problema del confinamiento nuclear de los protones, siendo el neutrón que él mismo postuló una de las piezas que harían que el puzle encajara. Precisamente uno de los estudiantes y posterior colaborador de Ernest Rutherford, James Chadwick, acabaría demostrando la existencia de la nueva partícula subatómica, en 1932. Y sería también otro discípulo de Rutherford, el físico danés Niels Bohr, a quien acogió en Mánchester como estudiante posdoctoral en 1911, quien daría el primer paso hacia la resolución definitiva del problema de la estabilidad de las órbitas.

## EL MUNDO CUÁNTICO

Rutherford había propuesto su modelo para la estructura atómica en 1911, a partir del análisis de los resultados del experimento de sus estudiantes Geiger y Marsden, corrigiendo así el trabajo previo de J.J. Thomson, quien había dirigido, a su vez, la investigación de doctorado de Rutherford. Precisamente en 1911, Niels Bohr visitaba a Rutherford en Mánchester y, de algún modo, recogía el testigo que este había tomado de Thomson en 1897, en Cambridge. Tan solo dos años después, en 1913, Bohr postularía el modelo atómico que lleva su nombre, corrigiendo y mejorando el de Rutherford y sentando, de una tacada, una de las bases de la llamada «vieja teoría cuántica».

Para entender adecuadamente el trabajo de Bohr de 1913, es necesario cambiar Mánchester por Berlín y remontarse a los últimos días del año 1900. Fue entonces cuando Max Planck presentó al mundo su hipótesis cuántica, iniciando (sin saberlo ni pretenderlo) una desconcertante y perturbadora revolución de nuestra comprensión de la realidad microscópica y, consecuentemente, del mundo subatómico que el modelo de Rutherford,



y antes el de Thomson, perseguían describir. El nada revolucionario propósito de Planck había sido, no obstante, completar la descripción del equilibrio entre la radiación y la materia, usando para ello el paradigma de su época, el electromagnetismo, acabado de perfilar por Maxwell, y la termodinámica estadística de, entre otros, Ludwig Boltzmann. Ese era el objeto de describir la *radiación del cuerpo negro*, tarea que había sido esquiva a los físicos teóricos de finales del siglo XIX.

Un cuerpo negro, denominado así porque su superficie absorbería toda la radiación incidente, es un sistema físico que emite radiación térmica de manera ideal. En concreto, las características de esta radiación emitida dependerán únicamente de la temperatura y nunca de otras propiedades del cuerpo o de su naturaleza particular. Constituye, por tanto, un modelo físico idealizado que puede, sin embargo, ser reproducido experimentalmente con muy buena aproximación. Por otra parte, la radiación térmica es aquella que todo cuerpo emite como resultado de su agitación térmica, es decir, fruto del alboroto molecular que se mide con la temperatura y que conduce al movimiento acelerado de las partículas subatómicas, eléctricamente cargadas. El espectro de emisión del cuerpo negro, el modo en que la energía emitida se reparte entre las diferentes frecuencias de onda electromagnética, depende únicamente de la temperatura del cuerpo, y está íntimamente ligado a la manera en que la materia absorbe y emite radiación. Planck, para poder explicar los precisos resultados experimentales disponibles para el cuerpo negro, necesitó postular que la energía portada por cada frecuencia emitida era un múltiplo entero de una cantidad elemental proporcional a dicha frecuencia. Formulada matemáticamente, la ley de Planck se expresaba por medio de la famosa ecuación:

$$E = h\nu,$$

donde  $E$  representa la energía de la cantidad elemental asociada a la frecuencia,  $\nu$ , y  $h$  es la llamada *constante de Planck*, que resultó ser una constante universal.

De la ley de Planck se deducía que el cuerpo negro radiaba energía en paquetes elementales o indivisibles. Para una frecuencia dada, existía una cantidad mínima de energía que podía ser transferida, y solo un múltiplo entero de esa cantidad, un número entero de paquetes elementales. Así, del mismo modo que Dalton, a partir de la ley de las proporciones múltiples, había inferido la discretización de la materia, Planck sugirió, con su explicación de la radiación del cuerpo negro, que la energía también se presentaba de manera discreta. En realidad, las conclusiones del trabajo inicial de Planck fueron bastante modestas, limitándose a aplicar su hipótesis cuántica a la radiación del cuerpo negro. Fue el trabajo de 1905 de Albert Einstein sobre el efecto fotoeléctrico, por el que sería galardonado con el premio Nobel de Física de 1921, el que definitivamente estableció el carácter universalmente discreto de la radiación electromagnética.

Heinrich Hertz había descubierto en 1886 que podía obtener una corriente eléctrica irradiando con luz la superficie limpia de un metal, pero solo cuando la frecuencia luminosa excedía un cierto valor umbral, que era característico de cada metal. Einstein atribuyó este fenómeno al carácter discreto de la radiación sugerido por la ley de Planck. Únicamente aquellos paquetes de luz con una energía mínima suficiente para arrancar los electrones de la banda de conducción propia del metal (aquellos que se han desligado de sus átomos respectivos y son compartidos por toda la estructura) podían contribuir a generar la corriente. Una energía mínima implicaba, pues, una frecuencia mínima, justificando así el efecto fotoeléctrico descrito por Hertz. De este modo, Einstein extendió la aplicación de la ley de Planck a toda forma de radiación electromagnética. Se llamó *cuantización* al fenómeno de discretización observado en la radiación y *cuanto* al paquete elemental de cuantización. La luz era y se propagaba como una onda electromagnética, pero transfería energía a la materia en forma de cuantos o corpúsculos que recibieron el nombre específico de *fonones*.

Regresemos ahora al trabajo de Bohr de 1913. Si la luz estaba cuantizada, argumentó Bohr, la cantidad de energía que posea un electrón ligado al núcleo podía estarlo también. El razonamiento podría desarrollarse como sigue. Todo cuerpo en una

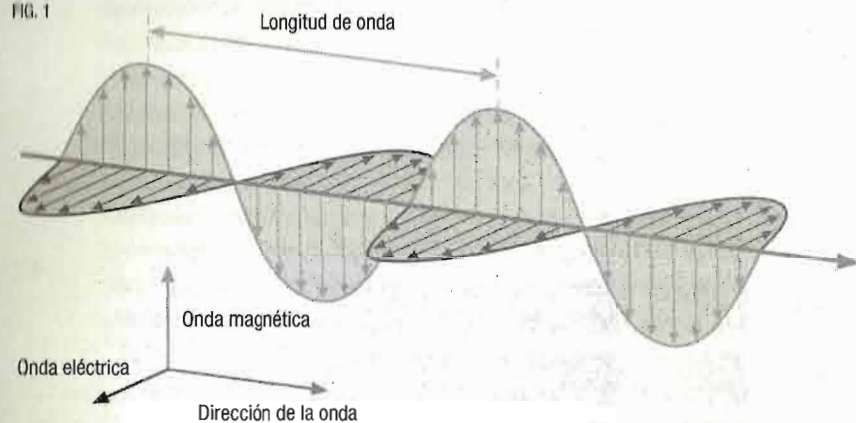
## LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Newton, usando las propiedades de refracción de un prisma, había conseguido descomponer la luz blanca del sol en un espectro de colores. Identificó siete, los siete colores del arcoíris, pero en realidad los colores que obtuvo cambiaban gradualmente, y de modo continuo, desde el violeta hasta el rojo. Más tarde, sir William Herschel descubrió una forma de radiación no visible que también provenía del Sol y que, al refractarse, quedaba localizada en el espectro más allá del rojo: el infrarrojo. También más allá del violeta, el Sol emitía radiación, el ultravioleta. Los trabajos de James Clerk Maxwell y, posteriormente, de otros como Oliver Heaviside o Heinrich Hertz proporcionaron los fundamentos para entender qué eran tanto la luz visible como las otras formas de radiación que extendían el espectro más allá del visible. Del mismo modo que una piedra, al caer en el centro de un estanque, provoca olas que se propagan hacia fuera en todas direcciones, las soluciones de las ecuaciones del campo electromagnético permiten la propagación, como una onda, de las variaciones acopladas de los campos eléctrico y magnético: ondas electromagnéticas.

### Frecuencias y longitudes de onda

Cualquier señal o perturbación del campo puede construirse como una superposición de múltiples ondas que oscilan periódicamente. La oscilación de estas ondas puede representarse mediante funciones trigonométricas (senos o cosenos) que muestran cómo varía la intensidad de los campos, alcanzando máximos y mínimos sucesivos (figura 1). La distancia entre dos máximos sucesivos se conoce como *longitud de onda* y el número de ondas que se emiten

FIG. 1



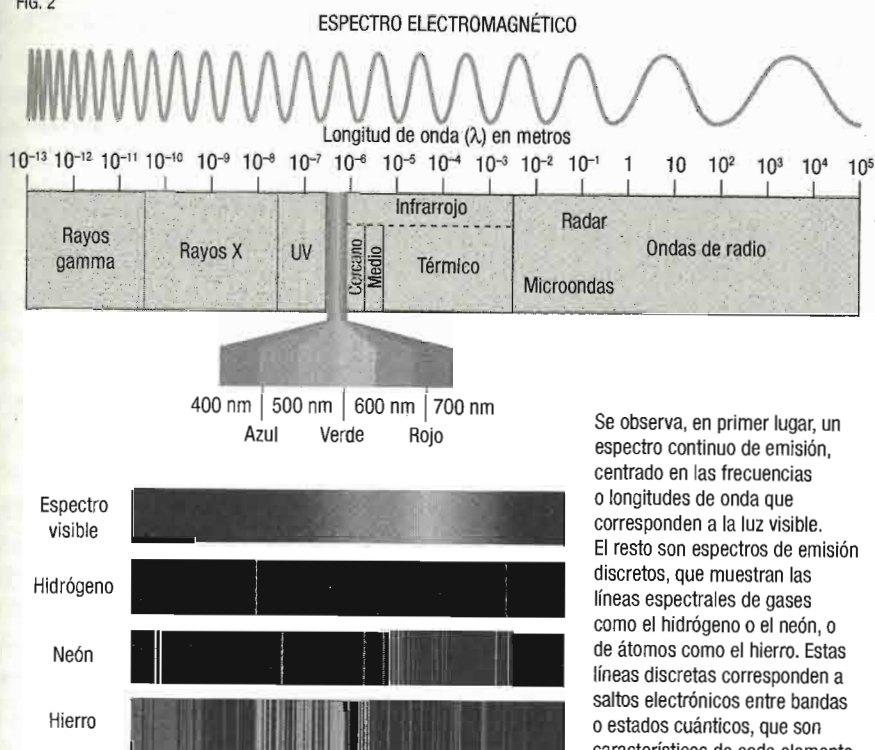
Propagación de una onda electromagnética en la que se aprecia la evolución periódica de los campos eléctrico y magnético en planos perpendiculares.

en un segundo se denomina *frecuencia*. El producto de ambas será igual a la velocidad de propagación de la onda, la velocidad de la luz para el caso de las ondas electromagnéticas que se propagan en el vacío. Cada color está caracterizado por una longitud de onda o frecuencia.

### Espectros electromagnéticos

El espectro electromagnético (figura 2), en general, está formado por el conjunto de todas las infinitas frecuencias posibles, aunque se habla también, de manera particular, de *espectro de emisión* para referirse al conjunto de frecuencias emitidas por un cuerpo o sustancia. Los espectros de emisión pueden ser continuos, como el de la radiación térmica (luz del sol), o discretos, cuando se emite un conjunto numerable de frecuencias (lámparas de descarga en un gas, como el neón o el mercurio).

FIG. 2



Se observa, en primer lugar, un espectro continuo de emisión, centrado en las frecuencias o longitudes de onda que corresponden a la luz visible. El resto son espectros de emisión discretos, que muestran las líneas espectrales de gases como el hidrógeno o el neón, o de átomos como el hierro. Estas líneas discretas corresponden a saltos electrónicos entre bandas o estados cuánticos, que son característicos de cada elemento.



órbita, gobernada por las leyes clásicas de la gravedad o el electromagnetismo, mantiene constante una magnitud física denominada *momento angular*. El momento angular para una órbita circular, por ejemplo, se obtiene de multiplicar la velocidad del cuerpo, su masa y el radio de la órbita. Y posee, precisamente, las mismas unidades o dimensiones físicas que la constante de Planck. Así, podía resultar natural imponer la cuantización del momento angular de la órbita, estableciendo el carácter discreto de este. En particular, Bohr postuló que el momento angular solamente podía ser un múltiplo entero de la constante de Planck dividida por  $2\pi$  (constante de Planck reducida). De ese modo, las órbitas posibles para el electrón ligado se reducían a un número discreto de ellas, denominadas *órbitas estacionarias*, y etiquetadas por dicho múltiplo entero,  $n$ , que recibió el nombre de *número cuántico principal*. La energía del electrón para cada órbita también podía escribirse como función del momento angular y, por tanto, del número cuántico principal, aumentando esta con el valor del número cuántico. Las energías discretas correspondientes a cada una de las órbitas permitidas pasaron a denominarse *niveles de energía*.

Además, Bohr postuló que el electrón solo podía cambiar de órbita cuando absorbía o emitía un fotón de energía adecuada, exactamente igual a la diferencia entre los niveles de partida y destino. Cuando el nivel de energía final era mayor que el inicial, el átomo absorbía el fotón, excitándose. Al revés, cuando el nivel final resultaba ser de menor energía, el átomo emitía el fotón, abandonando su excitación energética. De ese modo se explicaba que los espectros de emisión atómicos presentaran un número discreto de finas bandas, denominadas *líneas espectrales*, para ciertos valores de la frecuencia. Cuando los átomos de un gas eran irradiados, estos se excitaban al absorber únicamente los fotones adecuados. Posteriormente, cuando los átomos del gas recuperaban el estado anterior a la irradiación, solo se emitían fotones de la misma energía. En virtud de la ley de Planck, un fotón de una energía dada correspondía a una frecuencia particular, justificándose así la naturaleza discreta de los espectros atómicos observados.

En particular, el espectro atómico del hidrógeno era muy bien conocido experimentalmente y el modelo atómico de órbitas cuantizadas propuesto por Bohr podía describirlo con asombrosa precisión. Además, resolvía el problema de la estabilidad de los átomos. En el mundo macroscópico descrito por las ecuaciones de Maxwell, una partícula cargada describiendo una órbita cerrada debía radiar energía de manera continua; en cambio, en el mundo microscópico del electrón ligado al núcleo, aquel solamente podía «bajar» de un nivel de energía a otro de menor energía radiándose un fotón. Y así podía seguir, «cayendo» el electrón de un nivel a otro, hasta ocupar el de menor energía accesible, denominado *estado fundamental*. Una vez en su estado fundamental, el electrón ocuparía esta órbita de manera estacionaria. El átomo sería, pues, estable.

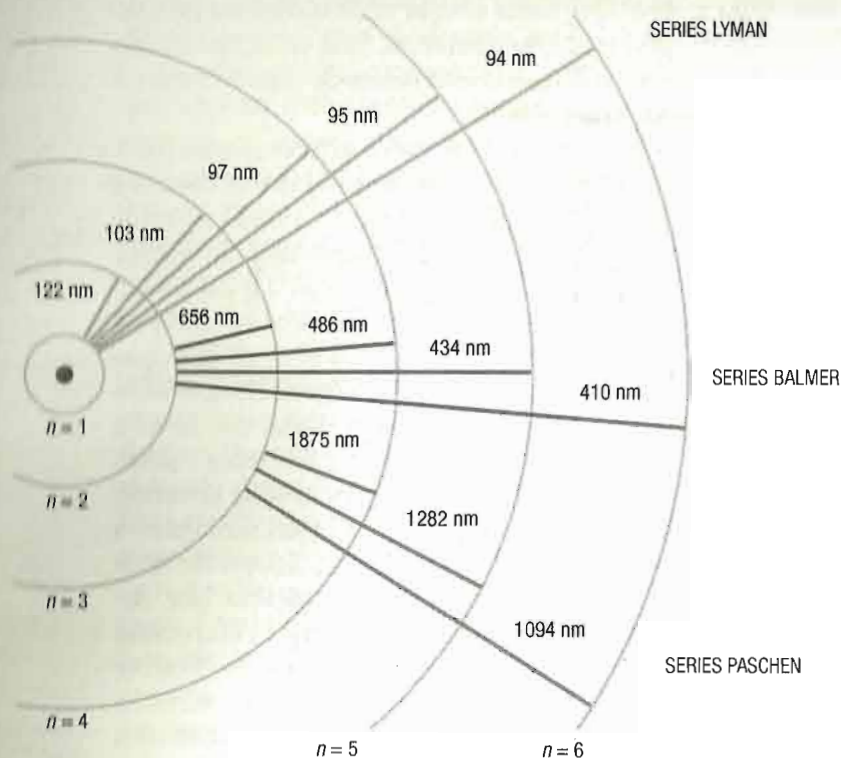
El éxito del modelo de Bohr probó que en el mundo microscópico regían leyes radicalmente nuevas, singularmente distintas de aquellas que dictaban la fenomenología del mundo macroscópico. Bohr, sin embargo, solo había completado un primer paso hacia la comprensión de esas nuevas leyes. En las postrimerías del primer cuarto del siglo pasado, el esfuerzo coral de una pléyade de sobresalientes físicos acabó el edificio de lo que hoy conocemos como mecánica cuántica. Louis de Broglie estableció en 1924 el carácter ondulatorio de la materia, que sirvió a Erwin Schrödinger para la construcción de su mecánica cuántica ondulatoria en 1926. Schrödinger derivó su famosa ecuación y la aplicó al átomo de hidrógeno, reobteniendo las condiciones de cuantización para los niveles de energía del átomo de Bohr (incluyendo sofisticaciones posteriores introducidas por Arnold Sommerfeld y otros, con objeto de explicar la emergente complejidad de los espectros atómicos). Previamente, Werner Heisenberg, Max Born y Pascual Jordan habían introducido en 1925 su propia mecánica matricial para describir la dinámica de los sistemas cuánticos. Ambas descripciones probaron ser equivalentes. En particular, Paul Dirac reinterpretó en 1926 las conocidas relaciones de indeterminación de Heisenberg, que ligaban variables dinámicas como la posición de una partícula y su cantidad de movimiento, como una extensión de la mecánica

## EL MODELO ATÓMICO DE BOHR

Los electrones no pueden orbitar de manera estable en torno al núcleo, tal como había planteado Rutherford. Bohr, aplicando las ideas de Planck, propuso la cuantización del momento angular,  $L$ , del electrón en la órbita:

$$L = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar,$$

FIG. 1



Representación de los niveles de energía en el modelo atómico de Bohr. Cuanto mayor es el número  $n$  para la órbita, mayor será la energía (menos negativa).

donde  $h$  es la constante de Planck,  $\hbar$  es la constante de Planck reducida ( $h/2\pi$ ) y  $n$  es el número cuántico principal. Así obtuvo que, para el átomo de hidrógeno, únicamente eran posibles un número discreto de órbitas estacionarias, cuyas energías respondían a la siguiente fórmula:

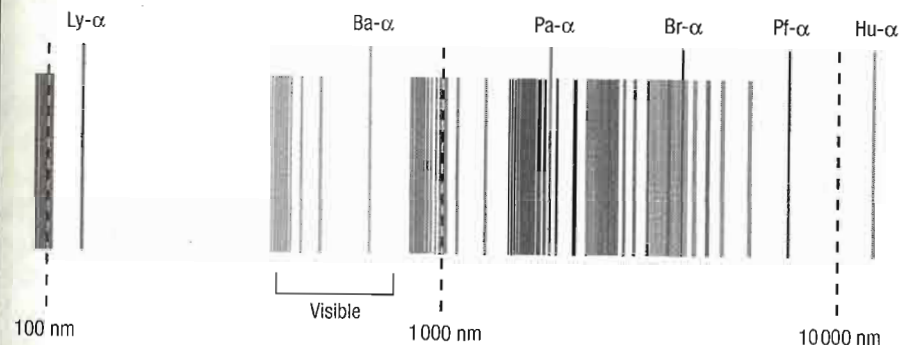
$$E_n = -\frac{1}{2} \frac{k^2 m_e e^4}{n^2 \hbar^2},$$

donde  $m_e$  y  $e$  son, respectivamente, la masa y la carga del electrón, y  $k$  es la constante de la fuerza electrostática de Coulomb. El signo negativo de la energía expresa que el electrón está ligado al núcleo, y solo cuando está libre o no ligado tendrá energía nula.

## Número cuántico y líneas espectrales

La transición del electrón desde una órbita de mayor a menor  $n$  provocará la emisión de un fotón cuya frecuencia dependerá de la diferencia de energía entre las órbitas, según la ecuación de Planck. El resultado será un espectro de emisión como el de la figura 1, en la que se representarán, en una escala logarítmica, las longitudes de onda,  $\lambda = c/\nu$ , asociadas a las frecuencias para estas transiciones entre niveles. Las transiciones entre órbitas producirán líneas espectrales como las que se indican en la figura 2.

FIG. 2



Primera línea espectral de las conocidas series de Lyman (Ly), Balmer (Ba), Paschen (Pa), Brackett (Br), Pfund (Pf) y Humphreys (Hu), que deben su nombre a sus descubridores.



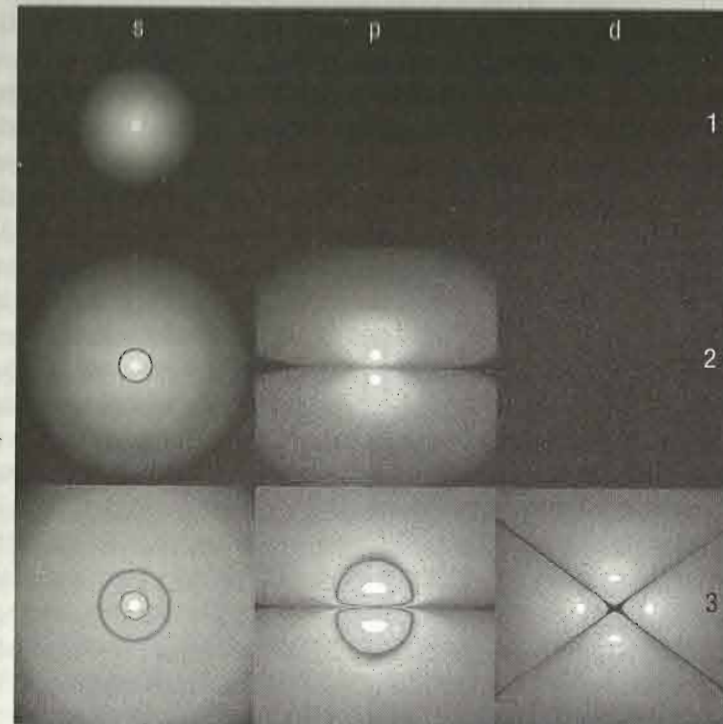
clásica, reformulando de una manera más general y matemáticamente abstracta la mecánica cuántica. Otros, como John von Neumann, contribuyeron también decisivamente a esta formulación matemática, que persiste actualmente.

En su formulación final, la mecánica cuántica describe los sistemas físicos por medio de una *función de onda* que evoluciona en el tiempo siguiendo los dictados de la ecuación de Schrödinger. La función de onda es un ente matemático abstracto, una función que toma valor en cada punto del espacio y contiene toda la información del sistema. En particular, la posición de una partícula solo tiene sentido cuando se realiza un experimento de medida, siendo el cuadrado de la función de onda en cada punto la probabilidad de que la partícula sea localizada en dicho punto (figura 1). Del mismo modo, cualquier otra observación física resultará, con alguna probabilidad, de operar con la función de onda. La mecánica cuántica es intrínsecamente no determinista, siendo totalmente impredecible el resultado particular de una observación dada. Las leyes cuánticas proporcionan, únicamente, probabilidades para el resultado de cualquier medida. Por tanto, solo pueden establecer las frecuencias estadísticas de los resultados cuando la medida se repite un número de veces suficientemente elevado.

## EL NÚCLEO, SUS DIMENSIONES Y SUS INQUILINOS

Las leyes clásicas resultaron ser una simple aproximación, válida únicamente bajo las condiciones de ese mundo macroscópico que parecían gobernar. Por ejemplo, cuando los momentos angulares eran mucho mayores que la constante de Planck. Dicha constante universal posee las mismas dimensiones que una magnitud física, denominada *acción*, fundamental para la evolución dinámica de los sistemas físicos. Dos magnitudes físicas cuyo producto posee dimensiones de una acción se dicen *conjugadas*, siendo estas las que componen cada una de las relaciones de indeterminación de Heisenberg, como la energía y el tiempo, o la cantidad de movimiento y la posición. La consecuencia de estas relaciones de indeterminación y, por tanto, de la cuantiza-

FIG. 1



Representación espacial del cuadrado de la función de onda de un electrón en el átomo de hidrógeno, para diferentes números cuánticos, que nos proporciona un mapa de la probabilidad de encontrar al electrón. El número cuántico principal se etiqueta con la letra  $n$  y toma los valores 1, 2, 3 (filas). El número cuántico orbital lo hace con la letra  $l$  y toma los valores 0, 1, 2 (columnas); los números cuánticos orbitales  $l = 0, 1, 2$  se designan como orbitales s, p, d, respectivamente. La probabilidad es menor cuanto más oscuro es el color.

ción tal como Dirac la interpretó, es que la precisión con la que es posible determinar dos magnitudes conjugadas está correlacionada, siendo el producto de las incertidumbres asociadas a cada una de ellas superior, en todos los casos y cualquiera que sea el proceso de medida, a la mitad de la constante de Planck reducida. En consecuencia, en un mundo en el que la constante de Planck adquiriese un valor nulo, las incertidumbres no estarían

acotadas inferiormente, desapareciendo los efectos de la cuantización. Un mundo así se comportaría clásicamente, gobernado por leyes clásicas como las del electromagnetismo de Maxwell.

En el mundo macroscópico que experimentamos cada día, la constante de Planck es, en términos relativos, ridículamente pequeña (¡el momento angular de un cuerpo de un kilogramo de masa, describiendo una órbita circular de un metro de radio, con una velocidad de un metro por segundo, sería 663 millones de veces mayor que un cuatrillón de veces la constante de Planck!). Por ello, los efectos cuánticos macroscópicos son inapreciables. Del mismo modo, la radiación electromagnética parece emitirse o absorberse de manera continua, dado que las energías transferidas son abrumadoramente mayores que la de un solo fotón.

En el mundo subatómico, en cambio, la realidad física es bien distinta. El electrón en el átomo de hidrógeno de Bohr, en su estado fundamental, porta un momento angular elemental que es unas seis veces más pequeño que la constante de Planck. Y solo absorbiendo un fotón de una frecuencia particular podía saltar a un estado excitado, adquiriendo el doble, el triple o, en general, un múltiplo entero de ese momento angular. El subatómico es un mundo de estados discretos y saltos cuánticos, gobernados por la ecuación de Schrödinger. Un mundo de incertidumbres y probabilidades, en el que la indeterminación sobre posición y cantidad de movimiento invalida el concepto clásico de trayectoria.

Rutherford, con su artículo de 1911, había explicado el experimento de sus estudiantes Geiger y Marsden usando argumentos clásicos: partículas alfa siguiendo trayectorias, desviadas por el campo creado por una distribución de carga concentrada en el núcleo. La interpretación era necesariamente distinta bajo la óptica de las nuevas leyes cuánticas. Cada partícula alfa aproximándose a un núcleo era un experimento de medida, necesariamente impredecible. La mecánica cuántica solo establecía una probabilidad para la distancia entre la partícula alfa y los protones del núcleo y, por tanto, para la intensidad con la que la interacción entre la una y los otros desviaría la trayectoria de la primera. En el experimento de Geiger y Marsden todas las trayectorias eran posibles para cada partícula alfa concre-

ta, proyectada contra un núcleo de oro, aunque con diferentes probabilidades. Precisamente, la mecánica cuántica trataba con dichas probabilidades, es decir, con las frecuencias de las trayectorias de dispersión que se obtenían al bombardear la lámina de oro con un haz de muchas partículas alfa. El recuento de partículas alfa dispersadas y las frecuencias obtenidas para cada ángulo de dispersión, justamente el resultado del experimento, eran el sujeto que la mecánica cuántica podía tratar. Y predecir. Así, el resultado del experimento dependía de la estructura del

átomo también desde una perspectiva cuántica. Informaba de la probabilidad de encontrar un protón en una región dada del espacio, a una cierta distancia del centro de masa del átomo (es decir, el punto geométrico donde podría concentrarse toda la masa del átomo sin que cambiara la descripción dinámica del mismo como un todo). Del mismo modo, las soluciones de la ecuación de Schrödinger para el átomo de hidrógeno precisaban la probabilidad de encontrar al electrón a una determinada distancia del núcleo.

Desde una perspectiva cuántica, antes de ser detectado, el electrón del átomo de hidrógeno no está localizado en ningún punto del espacio. Está deslocalizado y, con alguna probabilidad que viene dada por su función de onda, «vive» en todo el espacio. En su estado fundamental, 999 de cada 1 000 veces sería detectado en una esfera de radio igual a la tercera parte de una milmillonésima de metro. Técnicamente, diríamos que tiene una probabilidad de presencia integrada sobre dicha esfera superior al 99,9%. Así se define, en mecánica cuántica, la extensión espacial de un átomo, en este caso el hidrógeno. Asimismo, la probabilidad de presencia de los protones para cualquier átomo se extiende, con parecida probabilidad, a una esfera con un radio 100 000 veces menor, definiendo el tamaño mecanocuántico del núcleo atómico. Por tanto, su escala de distancias características es, aproximadamente, una milbillonésima de metro, unidad

Quando el electrón abandona el átomo, cristaliza fuera de la neblina de Schrödinger como un genio emergiendo fuera de su botella.

ARTHUR STANLEY EDDINGTON



que se conoce como *fermi*, en honor al físico italiano Enrico Fermi, al que nos referiremos más adelante.

El alumbramiento de una nueva disciplina, la física nuclear, cuyo objeto sería el estudio de esa diminuta región, de unos pocos fermis de radio, que concentraba prácticamente toda la masa y toda la carga positiva del átomo, había llegado de la mano de los trabajos de Rutherford, entre 1911 y 1919. En los años veinte del siglo pasado no se sabía mucho sobre un núcleo atómico que, desde luego, tenía que estar gobernado por las leyes cuánticas. Los protones, en el sentido mecanocuántico que hemos descrito, se alojaban en él. Pero no solos. Los desajustes numéricos entre los cocientes de masa y carga de los diferentes núcleos respecto al protón, que hemos señalado antes, ponían de manifiesto que el protón no podía ser el único inquilino del núcleo atómico. Lo mismo parecía inferirse de la existencia de diferentes variedades de núcleos para una única especie química, propuesta inicialmente por el radioquímico Frederick Soddy a partir de sus estudios de las cadenas de desintegración radiactiva en 1913, y confirmada posteriormente por los trabajos de Francis William Aston con su espectrógrafo de masas en 1919. Aston había desarrollado este instrumento con el fin de separar los átomos ionizados de un gas con diferentes masas, usando la desviación inducida en su trayectoria por un campo magnético, en proporción a la relación entre carga y masa (el principio era el mismo que había usado Thomson para medir la razón entre carga y masa del electrón). De ese modo, Aston pudo concluir que ciertos átomos de la misma especie química diferían en su masa; como el neón, que debía poseer dos tipos de núcleo, con masas iguales a 20 y 22 veces la del protón. Estas variedades de núcleo, por ocupar el mismo lugar en la tabla periódica de los elementos químicos, recibieron el nombre de *isótopos*.

La solución más sencilla para explicar la existencia de isótopos era aceptar que el núcleo también alojaba electrones. La idea parecía natural, dado que Rutherford había identificado un tipo de desintegración radiactiva, la desintegración beta, que implicaba la emisión de electrones por el núcleo. Así, el de neón podía contener 20 protones y 10 electrones, o 22 protones y 12 electrones.

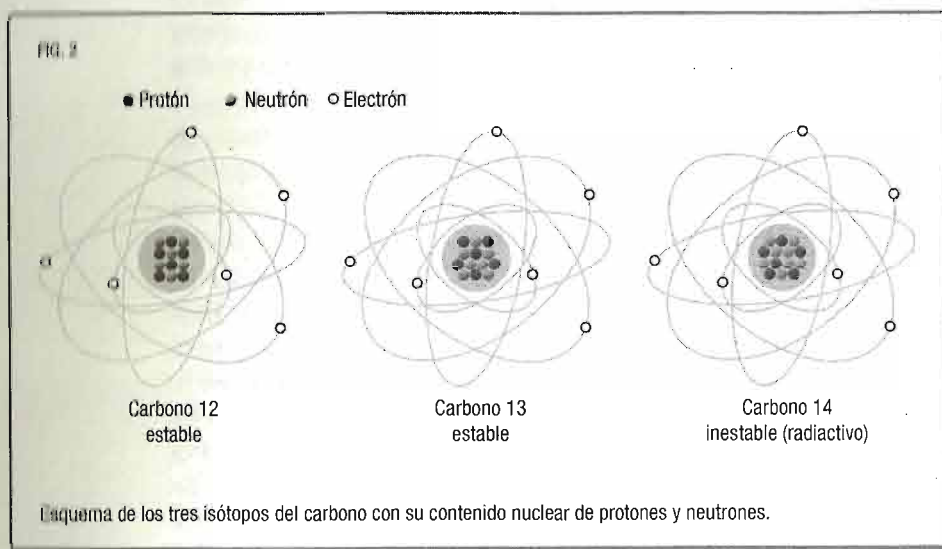
En ambos casos, con una carga eléctrica positiva neta igual a 10 veces la carga del electrón, compensada por los 10 electrones exteriores al núcleo, que ocuparían estados cuánticos atómicos. Además, podía especularse con que los electrones, con su carga negativa, permitirían alguna configuración eléctricamente estable en el núcleo. Constituirían alguna suerte de «cemento» nuclear. El núcleo más común de carbono contendría, pues, 12 protones y 6 electrones; el de nitrógeno, 14 protones y 7 electrones.

Este modelo nuclear, sin embargo, se reveló incorrecto en 1929. La refutación resultó de la medición, con técnicas espectroscópicas, del *espín* nuclear de hidrógeno y nitrógeno. El espín es un momento angular intrínseco portado por todas las partículas subatómicas y que, frecuentemente, suele ilustrarse por medio de la rotación de la partícula respecto a su propio eje (aunque esta imagen puede resultar equívoca). Si bien retomaremos el concepto de espín más adelante, al emerger este de manera natural en la descripción relativista del electrón, en el contexto en el que lo abordamos ahora nos basta con saber que es una propiedad cuántica que se expresa por medio de un número cuántico,  $s$ , que toma valores enteros o semienteros (un número impar dividido por 2). En el caso del electrón, el número cuántico de espín es  $1/2$ , y el del núcleo de hidrógeno, es decir, el protón, resultó ser también  $1/2$ . El sistema formado por dos o más partículas con espín posee un espín total que resulta de una regla de suma cuántica. Esta regla nos dice que, para un número impar de partículas con espín semientero, el espín total es necesariamente semientero. Por tanto, el núcleo de nitrógeno formado por 14 protones y 7 electrones debía tener un espín total semientero. Sin embargo, los experimentos de Franco Rasetti de 1929 probaron inequívocamente que el nitrógeno tenía espín nuclear entero.

El núcleo no podía estar formado por protones y electrones. La solución correcta vino de la mano del descubrimiento de una nueva partícula. Rutherford y su estudiante James Chadwick habían especulado con la posibilidad de que el núcleo atómico alojara una partícula eléctricamente neutra que justificaría el resto de la masa nuclear y que, de algún modo, debería contribuir a

la estabilización del núcleo. Finalmente, se descubrió una forma inusual de desintegración radiactiva que emitía radiación no ionizante (es decir, sin carga eléctrica) al bombardear el núcleo de berilio con partículas alfa. Irène y Frédéric Joliot-Curie interpretaron, erróneamente, que se trataba de radiación gamma, una tercera forma de emisión radiactiva que, sencillamente, correspondía a radiación electromagnética muy energética. James Chadwick, en 1932, realizó cuidadosas medidas experimentales que le permitieron concluir que se trataba, en cambio, de una partícula subnuclear hasta entonces desconocida, el neutrón.

El neutrón resultó ser una partícula de masa prácticamente equivalente a la del protón, eléctricamente neutra y con espín igual a  $1/2$ . De ese modo, el nitrógeno poseía un núcleo con 7 protones y 7 neutrones, un total de 14 partículas subnucleares de espín  $1/2$  que se combinarían para generar un espín nuclear total entero, como había medido Rasetti. Dos isótopos cualesquiera de un elemento dado compartían el mismo número de protones y diferían tan solo en el número de neutrones que cada uno alojaba en su núcleo (la figura 2 muestra, como ejemplo, los tres isótopos del carbono). El puzzle parecía completo, o casi.



## EL CEMENTO NUCLEAR

Tres ladrillos elementales, protón, neutrón y electrón, bastaban para explicar la complejidad de la materia, a partir de los diferentes átomos que con ellos podían fabricarse. Los dos primeros formaban el diminuto núcleo atómico, y por ello recibieron el nombre genérico de *nucleones*. El tercero ocupaba, con alguna probabilidad dictada por su estado cuántico, regiones del espacio de una escala de longitud 100 000 veces mayor que el núcleo. Las fuerzas electromagnéticas ligaban a los electrones con el núcleo, pero ¿qué mantenía a protones y neutrones ligados y densamente «apretados» para constituir el diminuto núcleo atómico? Por descontado, la respuesta no estaba en el electromagnetismo, que solo contribuiría a alejar unos protones de otros. Alguna otra forma de interacción, no conocida, tenía que ser la responsable de la estructura nuclear del átomo. Y, por ende, esa fuerza o fuerzas desconocidas tenían también que servir para explicar los procesos de desintegración radiactiva o las reacciones nucleares que transmutaban unos núcleos en otros, alterando su composición y estructura.

Rutherford y Soddy habían identificado, en 1902, dos formas de desintegración radiactiva que implicaban transmutación atómica, a saber, las desintegraciones o decaimientos alfa y beta. Caracterizadas entonces por el poder de penetración e ionización de la radiación resultante, hoy sabemos que la primera de ellas opera por la emisión de partículas que resultan ser núcleos de helio-4, es decir, el conjunto formado por dos protones y dos neutrones ligados que, de alguna manera, se desgajan del núcleo original. En el segundo caso, como el propio Soddy sugirió en 1913, la desintegración transforma el átomo de la especie original en otro de un elemento vecino, de su misma fila de la tabla periódica. Es decir, el número de protones o número atómico se ve incrementado o reducido en una unidad (los elementos se ordenan en la tabla periódica en razón de su número atómico). Por tanto, la desintegración beta es el resultado de la conversión, en el corazón del núcleo, de un neutrón en un protón o viceversa. En el primer caso, la conservación de la carga eléctrica decreta



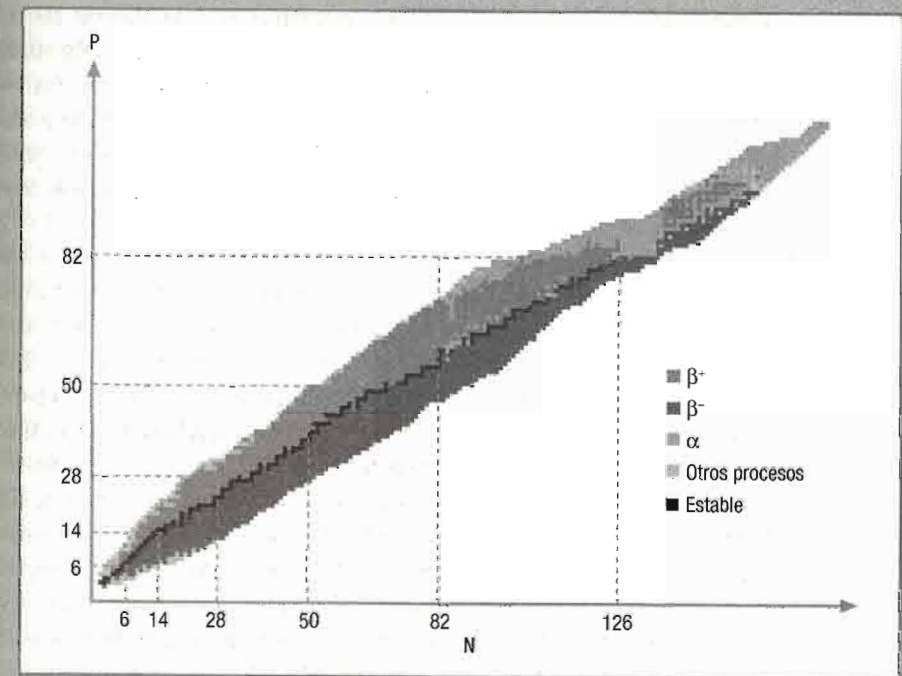
que el núcleo emita un electrón y se conoce como desintegración beta negativa (por el signo de la carga de la partícula radiada). El segundo caso, conocido como desintegración beta positiva, corresponde a la emisión de una partícula denominada *positrón*, casi idéntica al electrón aunque cargada positivamente, de la que hablaremos más adelante.

En todos los casos anteriores, ciertos isótopos decaen de manera natural y espontánea, alterando el número y proporción de sus neutrones y protones, y emitiendo partículas cargadas que ionizan la materia sobre la que inciden (precisamente este poder ionizante y la energía de las partículas radiadas confieren a la radiactividad su carácter nocivo sobre los tejidos vivos). Estos isótopos son, pues, inestables como resultado de su particular combinación de nucleones y se denominan *radiactivos*. Pero, además, los núcleos estables también podían ser inducidos a una reorganización de los nucleones que los componen, como Rutherford demostró en su experimento pionero de 1919, al bombardear nitrógeno con partículas alfa. Por tanto, algunas combinaciones de nucleones son más estables que otras, en la medida en la que son el resultado final de reacciones nucleares, del mismo modo que los productos finales de toda reacción química exotérmica, que libera energía, son más estables que los reactivos.

En el curso de cualquier reacción nuclear, las combinaciones finales de nucleones, es decir, los núcleos resultantes, se estabilizan al encontrarse estos más ligados que antes de la reacción. «Más ligados» significa que se hallan en una configuración de menor energía, como ocurre cuando un satélite orbita a menor distancia del centro de gravedad que lo atrapa. Al contrario, distanciar el satélite del centro de gravedad implica vencer las fuerzas gravitatorias y, consecuentemente, realizar un trabajo o, lo que es equivalente, comunicar cierta energía al satélite, que este acumulará por medio del campo gravitatorio. De modo análogo, en el mundo cuántico el átomo de hidrógeno es estable cuando el electrón se encuentra en su estado fundamental o de mínima energía, es decir, cuando se halla más ligado. Y se excita absorbiendo fotones que «elevan» el electrón a niveles cuánticos de

## EL MAPA DE LOS NÚCLEOS

Un núcleo es una combinación de protones y neutrones que puede representarse gráficamente en un diagrama de dos ejes, uno indicando el número de protones,  $P$ , y otro, el de neutrones,  $N$ . Cada núcleo ocupará un punto en el diagrama y el conjunto de núcleos, estables o inestables, que han sido identificados dibujan una banda en el diagrama que podemos ver en la figura. Este diagrama se conoce como *gráfico o mapa de los núcleos*. En el gráfico se observa que los núcleos estables se ordenan en una banda muy estrecha (señalada en negro) que se conoce como *valle de estabilidad*. También se indica, con diferentes tonos, el tipo de desintegración dominante. La gran mayoría de los núcleos situados por encima del valle de estabilidad decaen a formas estables con menor número de protones por emisión beta positiva (cambiando un protón por un neutrón) o, los que contienen más nucleones, por emisión alfa. Solo los núcleos más alejados por encima del valle decaen por emisión de protones. Por debajo, la gran mayoría se desintegra por emisión beta negativa (cambiando un neutrón por un protón) hacia una forma estable con más protones, y solo unos pocos, muy alejados, emiten neutrones. Un puñado de núcleos situados en una región alejada de la estabilidad tanto en número de protones como de neutrones (como el uranio-236, con 92 protones y 144 neutrones) experimentan la llamada *fiisión nuclear* y dan lugar a dos fragmentos más pequeños.





mayor energía, y menos ligados. En el núcleo, fuerzas de una naturaleza distinta, aunque igualmente atractivas, tienen que justificar que un puñado de nucleones sean más estables en el núcleo que alejados y aislados los unos de los otros. También tienen que justificar que el grado de estabilización dependa del número de nucleones y, dado que las desintegraciones beta mutan el neutrón en protón y viceversa, de la proporción entre protones y neutrones. Dichas fuerzas, el «cemento» responsable de la estructura del núcleo, fueron bautizadas simplemente como *fuerzas nucleares*.

No obstante, las desintegraciones alfa y beta parecían corresponder a procesos radicalmente diferentes. En las primeras, la partícula alfa portaba exactamente una energía igual a la diferencia entre las energías de los núcleos antes y después de la emisión, como dictaba el principio de conservación de la energía. En las últimas, en cambio, los electrones emitidos parecían poder portar energías dentro de un rango amplio y continuo, siempre inferior a la diferencia entre los núcleos inicial y final. Esta última propiedad de la desintegración beta parecía consagrar una violación del principio de conservación de la energía. Ello había conducido a Wolfgang Pauli a postular, en 1930, la existencia de una partícula eléctricamente neutra y muy ligera que, emitida simultáneamente al electrón, escapaba a la detección y se repartía con este la diferencia de energía entre los núcleos inicial y final. La variabilidad de este reparto de energía explicaba el rango continuo de emisión y rescataba el principio de conservación de la energía. Pauli acuñó el nombre de *neutrón* para tan fantasmagórica partícula, aunque el término fue finalmente destinado por Chadwick al también neutro aunque masivo compañero del protón en el núcleo. Enrico Fermi rebautizó la partícula de Pauli como *neutrino* y, en 1934, formuló una teoría para la desintegración beta basada en la conversión simultánea de un neutrón en tres partículas: protón, electrón y neutrino. Así, por ejemplo, cuando el carbono-14 (el isótopo de carbono con seis protones y ocho neutrones) se desintegraba, lo hacía porque uno de sus neutrones se transformaba, a su vez, como Fermi sugería. El resultado era un núcleo con siete protones y siete neutrones,

es decir, nitrógeno-14, y la emisión del electrón (causante de la radiactividad beta que había sido caracterizada por Rutherford y Soddy) y del misterioso y esquivo neutrino postulado por Pauli.

Protón, neutrón y electrón poseían espín  $1/2$  y otro tanto podía inferirse, indirectamente, para el neutrino por un principio físico fundamental que exigía la conservación del momento angular en el proceso de desintegración. Las cuatro partículas pertenecían a una clase que, en honor a Fermi, recibe el nombre de *fermiones* y que, precisamente, se caracterizan por poseer espín semientero. En un lenguaje moderno, la teoría de Fermi imponía una *interacción efectiva a cuatro fermiones* para describir la fuerza nuclear que gobernaba la desintegración beta. El adjetivo *efectiva*, en este contexto, hace referencia al hecho de que la teoría, aun dando cuenta de los fenómenos físicos observables, lo hace de forma necesariamente aproximada, al trabajar a una escala en la que los procesos elementales subyacentes no se ponen de manifiesto. La fuerza recibió el nombre de *fuerza nuclear débil*, en razón al hecho de que las probabilidades de ocurrencia del decaimiento nuclear beta parecían sugerir una intensidad de interacción insuficiente para explicar la ligadura, por ejemplo, entre el protón y el neutrón que formaban el isótopo de hidrógeno-2 (deuterio).

La fuerza nuclear débil no modificaba, por tanto, el número de nucleones en un núcleo, tan solo corregía y optimizaba la proporción entre el número de sus protones y neutrones. No podía ser, tampoco, la fuerza atractiva que mantenía ligados los nucleones y estabilizaba el núcleo. Esta última fuerza, denominada fuerza nuclear fuerte, había de ser la que gobernaba la desintegración alfa y posibilitaba la fragmentación del núcleo en dos entidades más estables, un núcleo de helio-4 y el resto. Solo un año después de que Fermi formulara su teoría para la fuerza nuclear débil, en 1935, el físico japonés Hideki Yukawa hizo lo propio para la nuclear fuerte. Yukawa derivó un *potencial*, que lleva hoy su nombre, para describir la interacción entre dos nucleones.

Previamente introdujimos el concepto de campo de fuerzas, para el electromagnetismo. El potencial es también un campo, relacionado con el de fuerzas, pero que asocia a cada punto del



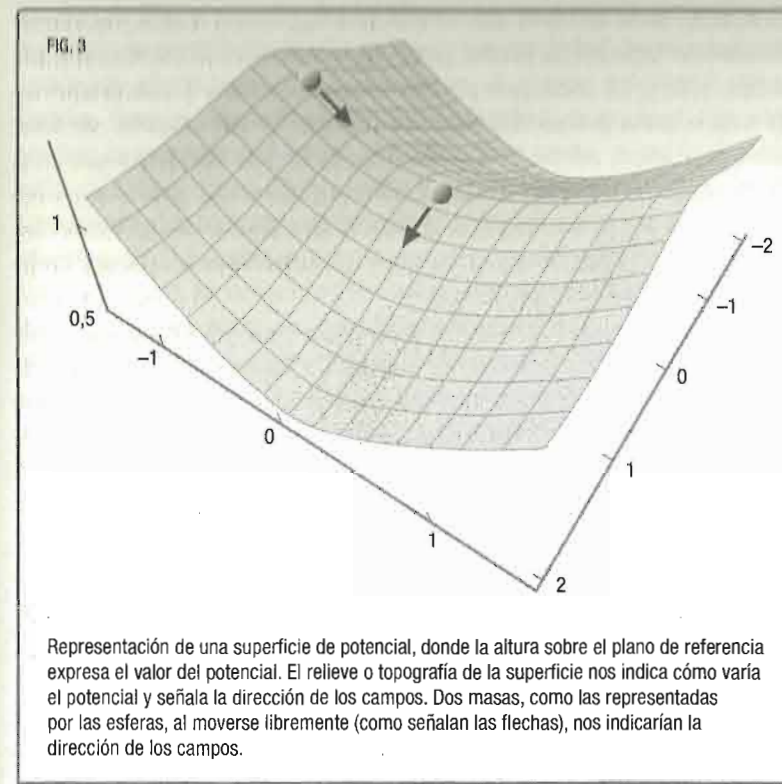
espacio la energía por unidad de carga (la que crea el campo) que adquiriría una partícula al localizarse en dicho punto. Aquel puede, de hecho, derivarse de este. Todos estamos familiarizados, por ejemplo, con el potencial electrostático, del cual se obtiene el campo eléctrico, que empujará a una carga eléctrica positiva a desplazarse en la dirección y sentido para los que la tasa de decrecimiento del potencial sea máxima, es decir, en la dirección

La naturaleza no estaba satisfecha con una simple carga puntual, necesitaba una carga con espín.

HIDEKI YUKAWA

y sentido para los que la energía de la partícula cargada en el seno del campo disminuya más rápidamente. Una útil analogía, ilustrada en la figura 3, consiste en imaginar que el valor del potencial en cada punto de un plano corresponde a una cierta altura sobre un nivel de referencia, el nivel del mar, por ejemplo. Así, el potencial representa una superficie con un cierto relieve, y el campo de fuerzas apunta en cada punto en la dirección y sentido de máxima pendiente descendente, siendo la intensidad del campo igual, precisamente, a dicha pendiente. Un cuerpo con alguna masa, dejado libremente sobre tal superficie, nos indicaría en cada punto, con su trayectoria de caída libre, la dirección del campo de fuerzas, y su aceleración de caída nos proporcionaría la intensidad.

El potencial de Yukawa originaría la fuerza nuclear fuerte de un modo análogo a como el campo eléctrico se obtiene del potencial electrostático. Yukawa obtuvo su potencial como una aproximación en una teoría de campos. Los nucleones, sugirió, poseían una suerte de carga nuclear, de naturaleza distinta a la eléctrica, que generaba y sentía los efectos de un campo. Dicho campo, como el electromagnético, debía cuantizarse. Y, del mismo modo que el cuanto del campo electromagnético resultó ser el fotón, las excitaciones en el campo de Yukawa debían estar engendradas por un nuevo cuanto o partícula. La fuerza nuclear fuerte era portada o mediada por esa nueva partícula, de algún modo que solo puede entenderse correctamente en el marco de las teorías cuánticas de campos que abordaremos en el siguiente capítulo. La nueva partícula fue bautizada como mesón  $\pi$  y se la conoce hoy día por su nombre abreviado: *pion*.



Fotón y pion habían sido postulados como partículas portadoras de fuerzas o interacciones y, por ello, debían poseer espín entero (como entenderemos más adelante). De manera genérica, se denominó *bosones* a las partículas con espín entero. El fotón era un bosón de espín 1 y el pion, de espín 0. La otra gran diferencia era que el pion, al contrario que el fotón, debía poseer masa. Esta diferencia explica una diferencia crucial entre la fuerza nuclear fuerte y el electromagnetismo. La fuerza nuclear fuerte era la principal responsable de la estructura nuclear pero, fuera del núcleo, escapaba a toda detección. Al contrario, la interacción electromagnética era poco relevante en el seno del núcleo, pero regía los fenómenos físicos a escalas atómica y molecular. De ello debe inferirse que la fuerza nuclear fuerte

es mucho más intensa que la electromagnética a una escala de distancias inferior al fermi, pero su intensidad decrece muy rápidamente y, en términos prácticos, resulta nula a una distancia de una o unas pocas decenas de fermis. Técnicamente, se dice que es *de corto alcance*. En cambio, la fuerza electromagnética es de largo (o infinito) alcance. El porqué reside, precisamente, en el valor de la masa para el bosón que porta cada fuerza. La razón puede entenderse, al menos cualitativamente, recurriendo al principio de incertidumbre.

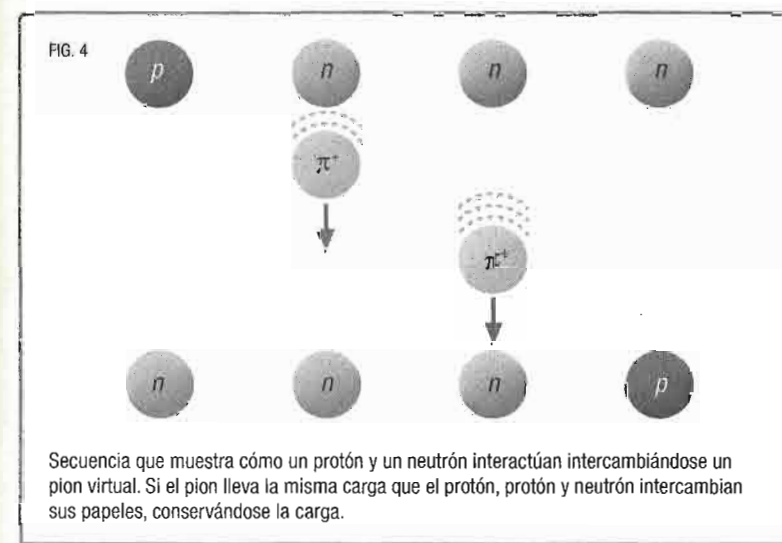
Cuando una partícula ejerce una fuerza sobre otra, durante un cierto intervalo de tiempo, le comunica una cantidad de movimiento; justamente la misma que pierde, en virtud del principio de acción y reacción. Toda interacción dinámica entre dos cuerpos es, en esencia, una transferencia de cantidad de movimiento o momento de uno a otro (un ejemplo obvio es el de una colisión clásica). En una teoría cuántica de campos, como la versión cuántica del electromagnetismo, se reinterpreta la interacción a distancia entre, por ejemplo, dos electrones en los siguientes términos: uno de ellos emite un fotón, que se propaga hasta el otro, que lo absorbe. La emisión del fotón viola el principio de conservación de la energía. Ello se debe a que la cantidad de movimiento que se lleva el fotón emitido debe corresponder exactamente con la que pierde el electrón, quedando así determinadas las energías de electrón y fotón, después del proceso de emisión. La suma de estas energías no equivale, en ningún caso, a la energía del electrón antes de la emisión. Esta violación opera en términos clásicos pero no cuánticos, siempre que el producto de la energía portada por el fotón  $\Delta E$  y el intervalo de tiempo  $\Delta t$  durante el que viaja entre los electrones se encuentre por debajo del límite fundamental proporcionado por el principio de indeterminación:

$$\Delta E \Delta t \leq \frac{\hbar}{2}.$$

El fotón es, en ese caso, sencillamente indetectable y se dice *virtual*, atribuyéndosele a él la violación explícita de la conser-

vación de la energía. Un fotón virtual es, en esencia, un mecanismo para la transferencia de momento o cantidad de movimiento entre los electrones que interactúan. A mayor momento transferido, mayor intensidad en la interacción; pero también será mayor la energía del fotón virtual y, por tanto, menor el intervalo de tiempo que dicho fotón puede propagarse antes de ser absorbido. La máxima distancia que podrá recorrer el fotón se obtiene de multiplicar este intervalo por la velocidad a la que viaja el fotón, la velocidad de la luz. En resumen, cuanto mayor es la distancia entre los electrones, menor es la intensidad con la que interactúan, y viceversa. Nada sorprendente. No obstante, por lejanos que puedan hallarse los electrones entre sí, siempre sería posible reducir el momento transferido y la energía portada por el fotón virtual (bajando su frecuencia), hasta hacerla tan próxima a cero como fuera necesario a fin de que los electrones continuaran interactuando. En ese sentido, la interacción electromagnética es de alcance infinito.

El mismo mecanismo y la misma interpretación puede aplicarse a la fuerza nuclear fuerte mediada por el intercambio de piones virtuales entre nucleones (figura 4). En cambio, aun en





el caso de que el momento transferido por el pion fuese nulo, la teoría de la relatividad especial (que introduciremos, también, en el próximo capítulo) nos dice que su energía sería igual al producto de su masa por el cuadrado de la velocidad de la luz. A mayor masa, mayor energía y, por tanto, menor tiempo de propagación para el pion virtual y menor alcance. En consecuencia, dado que el alcance de la fuerza nuclear fuerte debía ser del orden del radio nuclear, era posible estimar la masa del pion. Así, Yukawa predijo una masa aproximadamente igual a la décima parte de la masa del protón.

De ese modo, en el primer lustro de la década de 1930, Chadwick había descubierto el neutrón, completando una primera descripción aceptable del núcleo, y Fermi y Yukawa habían formulado dos teorías (en el lenguaje moderno, efectivas) que servían para describir, respectivamente, las fuerzas nucleares débil y fuerte. Como consecuencia de estas formulaciones, dos nuevas partículas habían sido postuladas: el neutrino y el pion. La última fue descubierta experimentalmente por el equipo de Cecil Powell en 1947, a partir del escrutinio de la radiación cósmica atmosférica con técnicas fotográficas. Este descubrimiento le valió a Yukawa el premio Nobel de Física de 1949 y a Powell, el de 1950. El neutrino, por su lado, fue detectado por primera vez en 1956 en el experimento dirigido por Clyde Cowan y Frederick Reines, que sirvió a este último para recibir el premio Nobel de Física de 1995. No así a Cowan, que había fallecido en 1974.

## Luz, materia y simetría

La formulación moderna de las interacciones elementales se basa en complejas abstracciones matemáticas que se apoyan en el álgebra, la simetría y la teoría de grupos. La teoría cuántica de campos que describe la interacción entre la luz y la materia fue la primera en desarrollarse. Las fuerzas nucleares fuerte y débil se acomodarían al mismo esquema.

La fuerza nuclear fuerte había sido descrita de manera efectiva por Yukawa, en 1935, a partir de la introducción de un campo cuyos cuantos corresponderían a una nueva partícula, el pion. Aunque no en el sentido moderno, la teoría de Yukawa podía considerarse como una teoría de campos cuántica (a las que nos referiremos, a partir de ahora, como TCC), una primera versión rudimentaria, al menos. Seguramente, en la misma medida en la que el modelo de Bohr merece el crédito de ser considerado el primer modelo cuántico del átomo o la primera descripción cuántica de la estructura de la materia.

Hoy, la física moderna establece que son cuatro las fuerzas fundamentales que, a nivel elemental, posibilitan la interacción entre los componentes últimos de la materia. Tres de ellas, el electromagnetismo y las fuerzas nucleares fuerte y débil, se ahorman perfectamente al marco de una TCC. A partir de ese andamiaje matemático común a las tres, fue posible su unificación en el denominado modelo estándar de la física de partículas. La cuantización de la cuarta, la gravedad, y su adaptación al marco de una TCC y del modelo estándar es un problema abierto aún y, desde luego, no exento de controversia. De las tres unificadas, el



prototipo paradigmático de TCC es la conocida como electrodinámica cuántica (QED, por sus siglas en inglés) que, además, fue la primera interacción en ser derivada formalmente a partir de la exigencia de un tipo particular de simetría y de la aplicación de la teoría de grupos, como veremos más adelante. El patrón desarrollado para la derivación de la QED fue replicado con éxito en la formulación posterior de las interacciones débil y fuerte.

La QED es la versión cuantizada del electromagnetismo. Es decir, la TCC que describe la interacción entre partículas cargadas por medio de un campo, el electromagnético, cuyas excitaciones son los fotones, la luz. Es, por tanto, la teoría que describe cómo interactúa la materia con la luz, atendiendo a las extravagantes leyes cuánticas. Pero el electromagnetismo resultó estar en la base no solo de la revolucionaria introducción de la mecánica cuántica que serviría para describir el mundo microscópico, sino también de la radical reformulación de la cinemática galileana en los términos de la teoría de la relatividad especial, que Albert Einstein dio a conocer en 1905. Precisamente por ello, la QED tenía que acomodarse también a las leyes de esta última. Debemos, por tanto, volver a remontarnos a los albores del siglo pasado, con el objeto de entender la cinemática relativista y cómo esta se ha incorporado a la descripción de las interacciones fundamentales. En particular, de la interacción fuerte.

## RELATIVIDAD, MASA Y ENERGÍA

La formulación de la relatividad especial, desarrollada por Albert Einstein en una serie de artículos que se iniciaron con su famoso trabajo de 1905 titulado «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento», tenía como objeto fundamental hacer del electromagnetismo una teoría invariante bajo cambios de sistemas de referencia. Ahondemos sobre esta cuestión absolutamente esencial, sobre todo desde la perspectiva de la formulación moderna de las interacciones fundamentales.

Todo observador de la realidad física determina las magnitudes cinemáticas y establece las leyes físicas desde un sistema de

referencia que le es propio. En esencia, ello significa que mide las distancias desde el punto espacial en el que se encuentra (o cualquier otro en reposo respecto a él) con su propia regla o aparato de medida, y calcula los tiempos con su propio reloj. De ese modo, con sus tiempos y sus distancias, puede obtener cualquier magnitud cinemática, como la velocidad o la aceleración de un cuerpo o una partícula. Igualmente, medirá magnitudes dinámicas como masas o fuerzas que, en última instancia, se derivarán en cada punto del espacio de algún campo de fuerzas. Las leyes físicas, como las que rigen el electromagnetismo, establecen relaciones entre estas magnitudes. Por ejemplo, las leyes de la dinámica de Newton relacionan la fuerza que actúa sobre un cuerpo con la aceleración que este adquiere y su masa. De hecho, la masa de un cuerpo se define como el cociente entre las intensidades de la fuerza aplicada y la aceleración resultante, expresando una suerte de resistencia del cuerpo al movimiento o *inercia*.

¿Dependen las variables cinemáticas del sistema de referencia? La respuesta es sí. Y es fácil entender el porqué. La física clásica aceptaba sin atisbo de discusión que las reglas y relojes para medir distancias e intervalos de tiempo eran universales (la distancia entre dos puntos dados, y fijados simultáneamente, era siempre la misma para todos los observadores, igual que el intervalo temporal entre dos sucesos determinados). En cambio, el sentido común y la experiencia cotidiana indicaban que la velocidad de un móvil (un cuerpo en movimiento) dependía, a todas luces, del sistema de referencia. Imaginemos una cinta transportadora, como las que son habituales en los aeropuertos. La velocidad de un individuo caminando sobre la cinta será una con respecto a un observador en reposo sobre la propia cinta, y otra distinta si la mide un observador apeado de ella, también en reposo. En el segundo caso hay que sumar a la primera velocidad la que lleva la cinta. El de la cinta es un caso particular de observadores que se acercan o se alejan entre sí con velocidad uniforme. A estos observadores, y a sus respectivos sistemas de referencia, se los conoce como *inerciales*. La conversión de magnitudes cinemáticas entre sistemas de referencia



inerciales resultaba especialmente sencilla. Como en el ejemplo de la cinta, se conseguía con una simple adición de posiciones y velocidades. No obstante, posiciones y velocidades son magnitudes vectoriales, es decir, que se definen, además de por su valor numérico o módulo, por su dirección y sentido en el espacio geométrico. Por tanto, su suma debe ser también vectorial. El conjunto de reglas que permiten esta conversión entre sistemas inerciales se conoce como *transformaciones de Galileo*.

Por otra parte, a menos que podamos señalar alguna propiedad física de los sistemas de referencia que privilegie a unos respecto a otros, las leyes físicas deben ser las mismas para cualquier observador. Este es el caso para los sistemas de referencia inerciales, donde cada observador puede estimarse en reposo e imputar el movimiento al resto de observadores inerciales. Y todos tendrán razón. O ninguno tendrá menos razón que los demás. En consecuencia, las leyes físicas debían ser invariantes bajo las transformaciones de Galileo. Es la manera técnica de decir que se deben poder aplicar primero las transformaciones de Galileo para pasar sus magnitudes cinemáticas a otro sistema de referencia, y entonces aplicar las leyes físicas en ese nuevo sistema de referencia; o proceder al revés, aplicando las leyes primero y transformando después. El resultado debe ser indistinto. La física no puede depender del observador.

Las transformaciones de Galileo no modificaban la aceleración. Todos los observadores inerciales medían, por tanto, las mismas aceleraciones, y también medían las mismas fuerzas y masas. Las primeras, por resultar de campos que, a su vez, estaban ligados al espacio, y las segundas, por constituir propiedades intrínsecas de cada cuerpo o partícula. Por tanto, las leyes de la mecánica de Newton resultaban trivialmente invariantes bajo las transformaciones de Galileo. El problema, nada desdeñable, estribaba en que las leyes de Maxwell para el electromagnetismo no lo eran. Efectivamente, las fuerzas que se derivan del campo magnético dependen de la velocidad de la partícula cargada que siente el campo. Y, como dijimos, las velocidades sí se transforman en las conversiones entre sistemas inerciales. La solución a este problema postulada por los físicos anteriores a

Einstein consistió en definir un sistema de referencia privilegiado, asociado a un medio físico de propiedades muy singulares, denominado éter, que llenaba el espacio y en el que residía el campo electromagnético. Era, por tanto, la velocidad de la carga en relación con este medio la que era necesario emplear en las ecuaciones del electromagnetismo. Además, si el campo «vivía» en ese medio, también sus perturbaciones se propagarían por él. Las ondas electromagnéticas, por tanto, viajaban por el éter. El problema parecía quedar resuelto con la definición de un sistema de referencia absoluto, asociado al medio por el que viajaba la luz.

Sin embargo, el éter debía de tener propiedades casi milagrosas para posibilitar que una onda viajara de modo mecánico a la increíblemente alta velocidad de la luz (casi 300 000 km/s) y, al mismo tiempo, ofrecer una fricción casi inexistente al movimiento orbital de los planetas. Finalmente, cuidadosos experimentos que perseguían evidencias indirectas de la existencia del éter acabaron por descartarlo y, al mismo tiempo, probaron que la luz mantenía una velocidad constante, medida desde cualquier sistema de referencia inercial. La velocidad de la luz era una constante física universal, independiente del sistema de referencia y del observador.

Sir Arthur Conan Doyle puso en boca de su célebre detective Sherlock Holmes la siguiente sentencia: «Cuando se ha descartado todo lo imposible, la explicación que queda, por extraña que parezca, tiene que ser la solución». No consta que esta cita inspirara a Einstein pero, desde luego, puede aplicarse a su formulación de la relatividad especial, con toda la pertinencia del mundo. Puesto que el electromagnetismo de Maxwell parecía a prueba de toda refutación, Einstein modificó las reglas de transformación entre sistemas inerciales. Y lo hizo atendiendo a la evidencia experimental de una velocidad de la luz universalmente constante en todos los sistemas de referencia inerciales. El resultado fueron las conocidas como *transformaciones de Lorentz*. Estas no operaban, como las de Galileo, sobre los vectores que representaban la posición o la velocidad, como funciones de una variable, el tiempo, que discurría universal e



independientemente de los sistemas de referencia. Las nuevas transformaciones, en cambio, actuaban simultáneamente sobre posición y tiempo, modificando la una a costa del otro, en función de la velocidad entre observadores. Los intervalos de tiempo resultaban ser diferentes al ser

Desde que los matemáticos invadieron la teoría de la relatividad, ni yo mismo la entiendo.

ALBERT EINSTEIN

medidos por observadores diferentes. Y también las distancias. Los primeros se dilataban con la velocidad y las últimas se contraían. Los relojes y las reglas de medida perdían así su carácter universal.

La física relativista no se desarrollaba en un espacio tridimensional habitado por vectores, sino en un espacio-tiempo de cuatro dimensiones en el que vivían *cua-drivectores*, vectores de cuatro componentes: las tres de un vector, como la posición o la cantidad de movimiento, y una magnitud escalar, como el tiempo o la energía. Las transformaciones de Lorentz actuaban de manera natural sobre estos *cua-drivectores*, incrementando unas componentes a costa de otras. Las leyes físicas tenían, pues, que reescribirse en términos de estas nuevas entidades. Las leyes de Maxwell, en particular, se adaptaban bien al nuevo lenguaje y, adecuadamente formuladas, resultaban claramente invariantes bajo las transformaciones de Lorentz. La relatividad especial llevó la unificación de los fenómenos electromagnéticos más lejos de lo que lo había hecho Maxwell con sus ecuaciones. Campo eléctrico y campo magnético formaban parte de una misma entidad sobre la que actuaban las transformaciones de Lorentz, transmutando parcial o totalmente el uno en el otro. Unos observadores medirían un campo eléctrico (o mayor campo eléctrico); otros, un campo magnético (o mayor campo magnético), pero las fuerzas y las aceleraciones finales conducirían siempre a la misma realidad física, independientemente de qué observador la escrutará.

Las ecuaciones dinámicas, es decir, las que relacionan fuerzas con aceleraciones y describen la evolución de los sistemas físicos con el tiempo, también tenían que ser reformuladas. Una de las principales consecuencias de dicha reformulación resultó

ser la equivalencia relativista entre masa y energía que, de manera general, puede expresarse como sigue:

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4},$$

donde  $E$  es la energía de una partícula,  $m$  es su masa invariante o masa en reposo,  $p$  es la cantidad de movimiento y  $c$  es la velocidad de la luz. La masa en reposo es la extensión relativista del concepto de masa newtoniana, independiente del observador. En el caso concreto de una partícula en reposo, de la anterior ecuación se obtiene (basta con anular la cantidad de movimiento, por ser cero la velocidad) la popularmente conocida ecuación  $E = mc^2$ , indisolublemente ligada en el imaginario colectivo a Einstein y su teoría de la relatividad. De la dinámica relativista se infería, también, que la cantidad de movimiento de una partícula con masa en reposo no nula se hacía infinita cuando su velocidad se aproximaba a la velocidad de la luz. En consecuencia, solo las partículas con masa en reposo nula, como los fotones, podían alcanzar dicha velocidad. La velocidad de la luz era una constante universal con un profundo significado dinámico: nada podía propagarse a una velocidad superior.

La equivalencia entre masa y energía establecía, para una partícula o para un sistema de partículas (como un núcleo) en reposo, que su energía era directamente proporcional a su masa. Así, cuando los nucleones se juntaban para formar un determinado núcleo, estabilizado por las fuerzas nucleares, el resultado era una masa para el núcleo final inferior a la suma de las masas de sus nucleones constituyentes. La diferencia entre una y otra es lo que se conoce como *energía de ligadura* y mide la estabilidad del sistema nuclear, sobre todo cuando se expresa en proporción al número de nucleones constituyentes. Análogamente, en las reacciones nucleares, la masa o suma de las masas de los productos finales es también inferior a la del núcleo o núcleos reactivos. Por ejemplo, tras una serie de procesos, cuatro protones pueden acabar formando un núcleo de helio-4,

## TRANSFORMACIONES DE LORENTZ Y DE GALILEO

Consideremos dos sistemas de referencia inerciales  $R$  y  $R'$ , que se definen por dos puntos de referencia y por un sistema de tres ejes de coordenadas, perpendiculares entre sí, ligados a dos puntos  $O$  y  $O'$ , respectivamente. El punto  $O'$  se desplaza respecto al punto  $O$  con velocidad constante,  $v$ , como se indica en la figura. La posición de una partícula dinámica estará fijada por las tres coordenadas referidas a cada uno de los ejes, que denominaremos  $x$ ,  $y$  y  $z$  para el sistema  $R$ , y  $x'$ ,  $y'$  y  $z'$  para el sistema  $R'$ . La posición de la partícula depende de la variable tiempo,  $t$ , y por ello las coordenadas de la partícula dependen también de  $t$  en  $R$  o de  $t'$  en  $R'$ .

### Transformaciones de Lorentz

Las coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  son las tres componentes de un vector espacial, el vector posición. Las transformaciones de Lorentz que permiten transformar las coordenadas del sistema  $R$  en las del sistema  $R'$  operan, sin embargo, sobre un vector de cuatro componentes, denominado **cuadrivector**, que incluye también al tiempo. Dichas transformaciones pueden escribirse como:

$$\begin{pmatrix} ct' \\ x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ct \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{aligned} t' &= \gamma \left( t - \frac{\beta}{c} x \right) \\ x' &= \gamma (x - \beta ct) \\ y' &= y \\ z' &= z \end{aligned}$$

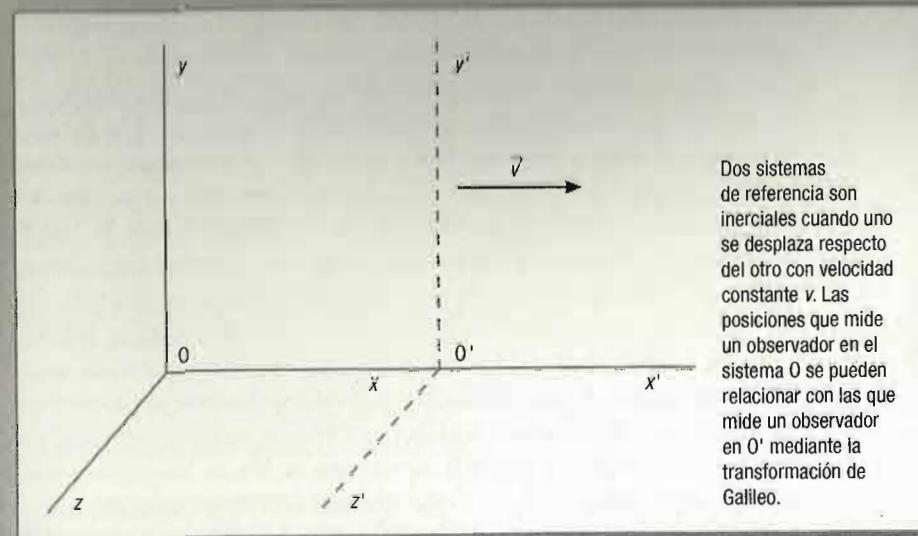
donde  $\beta = v/c$ ;  $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ ;  $c$  es la velocidad de la luz y  $v$  es la velocidad con la que  $O'$  se desplaza respecto a  $O$  en la dirección del eje  $x$ . La ecuación a la izquierda emplea una notación matricial compacta que, desarrollada, se traduce en las cuatro ecuaciones de la derecha, que relacionan las componentes de la posición en  $R'$  con las de  $R$ , completando la transformación del cuadrivector.

### El caso límite galileano

Las ecuaciones de la transformación ponen de manifiesto que el cambio de un sistema de referencia a otro mezcla las componentes espaciales y temporales: el instante  $t'$  para el evento, medido en  $R'$ , depende simultáneamente del instante  $t$  y la componente espacial  $x$ , medidas en  $R$ . El tiempo está dinámicamente ligado al espacio y no puede considerarse independiente del sistema de referencia. Si se considera el caso en el que  $v/c \ll 1$  (la velocidad de un sistema de referencia respecto al otro es mucho menor que la velocidad de la luz), podemos aproximar por un caso límite en el que  $\beta=0$  y  $\gamma=1$ . En ese caso, las transformaciones que resultan son:

$$t' = t, \quad x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z;$$

que corresponden a las transformaciones de Galileo, y que muestran cómo el tiempo se desdobló del espacio y se hace independiente del sistema de referencia.



Retrato de Galileo realizado por el pintor flamenco Justus Sustermans en 1636. A la derecha, monumento a Henrik A. Lorentz que se encuentra en un parque de Arnhem, su ciudad natal.



liberando además dos positrones y dos neutrinos. La masa de un protón, expresada en unidades adecuadas a su pequeñez, es igual a 938; la masa del núcleo de helio-4, en las mismas unidades, es igual a 3727. Un sencillo cálculo aritmético nos dirá que el núcleo de helio-4 es 25 unidades más ligero que los cuatro protones iniciales. Las unidades a las que nos referimos, adecuadas para el mundo microscópico, se conocen como  $\text{MeV}/c^2$  y representan una energía dividida por la velocidad de la luz al cuadrado. Dado que el defecto de masa que resulta de la estabilización del sistema nuclear se libera en forma de energía, en virtud de la ecuación de Einstein, la elección de estas unidades hace inmediata la conversión. De hecho, los físicos suelen usar energías para referirse a las masas de los núcleos y partículas subnucleares, haciendo implícita la división por la velocidad de la luz al cuadrado. La unidad de energía se llama *megaelectronvoltio* (MeV) y equivale a la que tendría un electrón sometido a una diferencia de potencial eléctrico de un millón de voltios. En particular, la mencionada reacción nuclear producirá 25 MeV en forma de radiación o de energía cinética de las partículas liberadas (las masas en reposo de los electrones o los neutrinos pueden obviarse). Dicha reacción, la fusión de cuatro protones para dar un núcleo de helio, es la fuente primaria de energía de nuestra estrella, el Sol, y el motor de la vida en la Tierra.

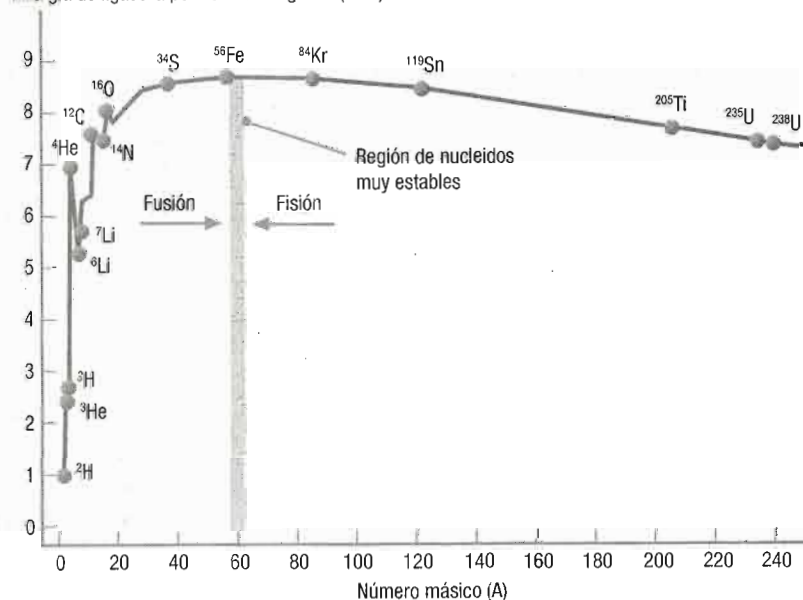
## PARTÍCULAS, ANTIPARTÍCULAS Y CAMPOS

La mecánica cuántica y la relativista tenían que acomodarse la una a la otra para dar cuenta de la fenomenología del mundo microscópico. Así tenía que ser para, por ejemplo, la interacción de un electrón y un fotón, pero también para un electrón ligado por un potencial, como sucedería si este se hallara en las proximidades de un protón. Es decir, la ecuación de Schrödinger que describía los estados cuánticos del átomo o, en general, la evolución dinámica de cualquier sistema cuántico, debía ser corregida. Oskar Klein y Walter Gordon habían propuesto, ya en 1926, que la ecuación de onda que lleva hoy sus nombres describía

## ESTABILIDAD NUCLEAR Y COMBUSTIBLE ESTELAR

La energía de ligadura por nucleón mide la estabilidad de cada núcleo. Los valores de máxima estabilidad se alcanzan en el entorno del hierro-56. En concreto, el núcleo más estable corresponde al níquel-62, indicando que un colectivo de 62 nucleones (28 protones y 34 neutrones) constituye el sistema nuclear más estable en la naturaleza. La fusión de núcleos más pequeños para alcanzar esta combinación, o aproximarse a ella, está energéticamente favorecida. El helio-4 es también una combinación muy estable, mucho más que sus vecinos en número de nucleones. Esa estabilidad permite entender que, en la desintegración alfa, los núcleos pierdan fragmentos equivalentes a helio-4. También explica que la fusión de hidrógeno en helio-4 sea el proceso que produce principalmente la energía estelar. Ningún otro proceso de fusión, que también se dan en ciertos estadios de la vida de las estrellas, libera tanta energía. La fisión de núcleos con un número alto de nucleones produce también fragmentos que se aproximan lo más posible a la región del hierro. Por ejemplo, el uranio-236 produce criptón-92 y bario-141, liberando además tres neutrones.

Energía de ligadura por nucleón negativa (MeV)

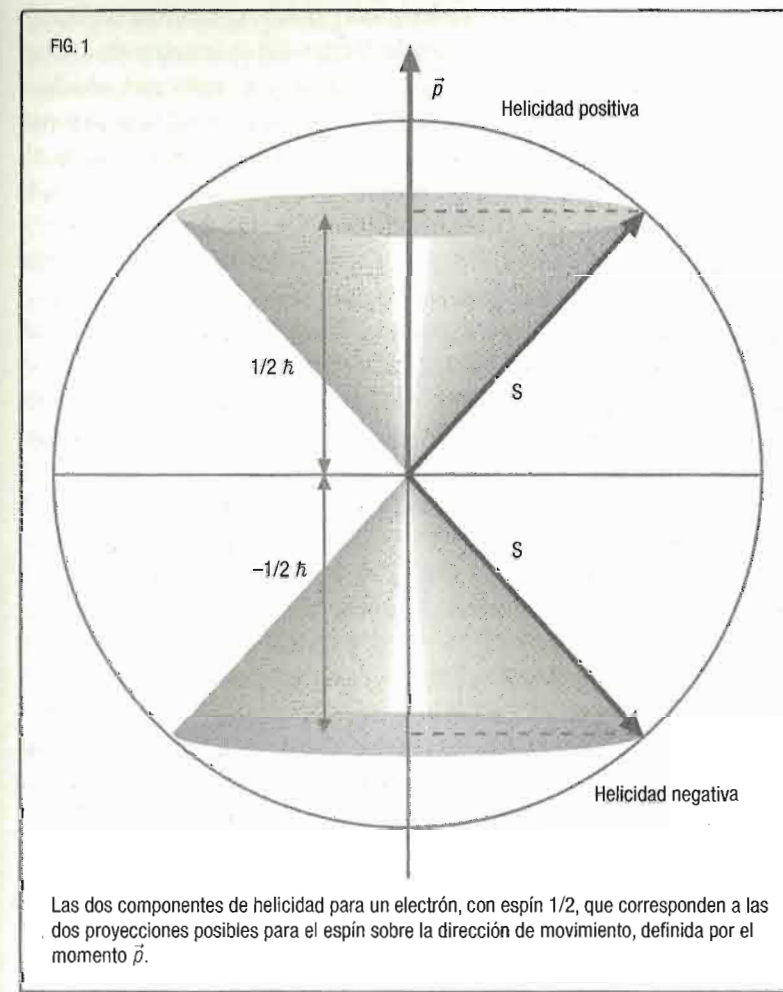


la evolución cuántica de un electrón relativista. Planteaba, sin embargo, algunos problemas y fue descartada frente a la versión no relativista de Schrödinger. En particular, la ecuación de Klein-Gordon no admitía una interpretación probabilística equivalente a la de Schrödinger y, si bien la energía de la partícula estaba relacionada con su masa por medio de la ecuación de Einstein, nada le impedía ser negativa ni, lo que era más difícil aún de conciliar con los experimentos, ser infinitamente negativa. Esto último implicaba la ausencia de un estado fundamental o de mínima energía que parecía posibilitar que un electrón siempre pudiera «caer» de un nivel a otro más bajo en energía. Ni un electrón libre (en ausencia de fuerzas) resultaría ser dinámicamente estable, gobernado por la ecuación de Klein-Gordon.

El físico teórico británico Paul Adrien Maurice Dirac estableció, en 1928, la generalización correcta de la ecuación de Schrödinger que podía aplicarse a partículas relativistas de espín  $1/2$ , como el electrón. La ecuación, que lleva su nombre, opera sobre una función de onda que posee cuatro componentes, dos con energía positiva y dos con negativa, que representan estados cuánticos en los que el espín apunta en la dirección del movimiento o en la opuesta. En la práctica, se define una propiedad cuántica denominada *helicidad* a partir de la proyección del espín sobre la cantidad de movimiento, que toma dos valores, positivo y negativo, en función de la orientación de uno respecto al otro (figura 1). Las cuatro componentes de la función de onda pueden considerarse como vectores de un espacio abstracto, diferente del espacio-tiempo físico, y reciben el nombre de *espinores*. De este modo, Dirac introducía el espín como una variable discreta adicional para caracterizar la función de onda, un grado de libertad más, necesario para satisfacer la ecuación relativista para la energía. El espín era, por tanto, una propiedad intrínseca de las partículas que se ponía naturalmente de manifiesto con su descripción relativista.

Sin embargo, como se deduce de lo anterior, la ecuación de Dirac adolecía, en principio, del mismo problema que la de Klein-Gordon respecto de los estados de energía negativa. Dirac tuvo entonces una genial intuición que le permitió interpretar

correctamente el significado de estos estados. La idea de Dirac puede explicarse como sigue. El estado fundamental corresponde al nivel de menor energía que, en este caso, el electrón puede ocupar. El electrón es un fermión, una partícula con espín semientero, para las que Pauli había establecido su *principio de exclusión*, que decretaba que dos partículas no podían ocupar el mismo estado, con idénticos valores para todos sus números





cuánticos. Entonces, si el estado fundamental de un electrón libre, propagándose en el vacío, debía tener energía positiva, ello debía significar que los estados de energía negativa eran inaccesibles. Y debían serlo, en virtud del principio de exclusión, porque estaban ya ocupados. De ese modo, Dirac identificó el vacío físico, al menos en lo que respecta a su teoría para los electro-

nes, con un conjunto infinito de estados de energía negativa, ocupados todos, que pasó a conocerse como *mar de Dirac*. En la imagen de Dirac, el vacío era mucho más que «nada», poseía una estructura compleja y era infinitamente rico en partículas en alguna suerte de estado indetectable. Aunque en unos términos algo distin-

tos, la intuición de Dirac sobre el vacío resultó ser esencialmente correcta desde la perspectiva de una TCC.

Pero continuemos con la imagen de Dirac. Este se percató de que, teóricamente al menos, era posible que alguno de los electrones del mar de Dirac absorbiera uno o más fotones, excitándose hasta alcanzar un nivel de energía positiva. En ese caso, el electrón excitado tendría que poder ser detectado como un simple electrón, sin ninguna rareza o anomalía propias, pero dejaría un «hueco» en el mar de Dirac que también debería poder detectarse. De hecho, el estado correspondiente al mar con un hueco poseía, respecto al mar lleno, un exceso de carga exactamente igual a la de un electrón y de signo opuesto y una diferencia de energía positiva. Por tanto, Dirac postuló que un hueco tenía que ser percibido como una partícula totalmente equivalente al electrón excepto por su carga, que sería la misma, pero positiva. Dirac la definió como la antipartícula del electrón y, finalmente, fue detectada en 1932 por Carl David Anderson y bautizada como *positrón*.

En resumen, en la imagen de Dirac, un electrón del mar podía absorber energía y subir a un estado de energía positiva, produciéndose una pareja partícula-hueco; es decir, podía crearse un par de partícula y antipartícula simplemente a partir de energía.

Al revés, si un electrón hallaba un hueco, podía ocuparlo liberando la diferencia neta de energía entre los niveles respectivos de partícula y hueco, es decir, partícula y antipartícula podían aniquilarse entre sí, produciendo energía. La equivalencia relativista entre masa y energía, una vez más, hacía posibles ambos fenómenos. Además, la ecuación de Dirac no se aplicaría únicamente al electrón, sino también a cualquier fermión de espín  $1/2$ . Las consecuencias de la ecuación, los estados de energía negativa y su interpretación en términos de antipartículas debían, por tanto, extenderse a todos ellos. Cada una de las partículas subatómicas que se ensamblaban para sustentar la estructura atómica de la materia debía poseer su propia antipartícula. Así, después de haber propuesto su existencia teórica, el antiprotón fue descubierto experimentalmente en 1955, por Emilio Segrè y Owen Chamberlain, y el antineutrón, en 1956, por Bruce Cork. Dirac fue galardonado con el premio Nobel de Física en 1933, junto a Erwin Schrödinger, por sus logros teóricos en la descripción del mundo subatómico.

Sin embargo, a pesar de ser inspiradora y productiva, la idea del vacío de Dirac no podía ser fundamentalmente correcta. Adolecía de problemas difíciles de soslayar, como la carga negativa infinita que concedía al vacío. La verdadera naturaleza del vacío cuántico-relativista emergería con la expresión de la interacción en el marco de una teoría de campos apropiadamente cuantizada. Los conceptos clásicos de campo de fuerzas y de potencial han sido ya introducidos en capítulos anteriores. La idea original fue desarrollada por el físico británico Michael Faraday, en el segundo cuarto del siglo XIX, con el propósito de describir los fenómenos electromagnéticos evitando la apelación a las engorrosas fuerzas a distancia que Newton había necesitado para explicar tanto las órbitas planetarias como la caída de un cuerpo por la acción de la gravedad terrestre. Faraday había observado que las fuerzas magnéticas que atraían el polo norte de un imán hacia el polo sur de otro orientaban también las limaduras de hierro que se diseminaban en el espacio entre ambos imanes, forzándolas a depositarse a lo largo de líneas que unían ambos polos. Esta constatación le llevó concluir que las fuerzas

En ciencia uno intenta decir a la gente, de una manera en que todos lo puedan entender, algo que nunca nadie supo antes. En la poesía es exactamente lo contrario.

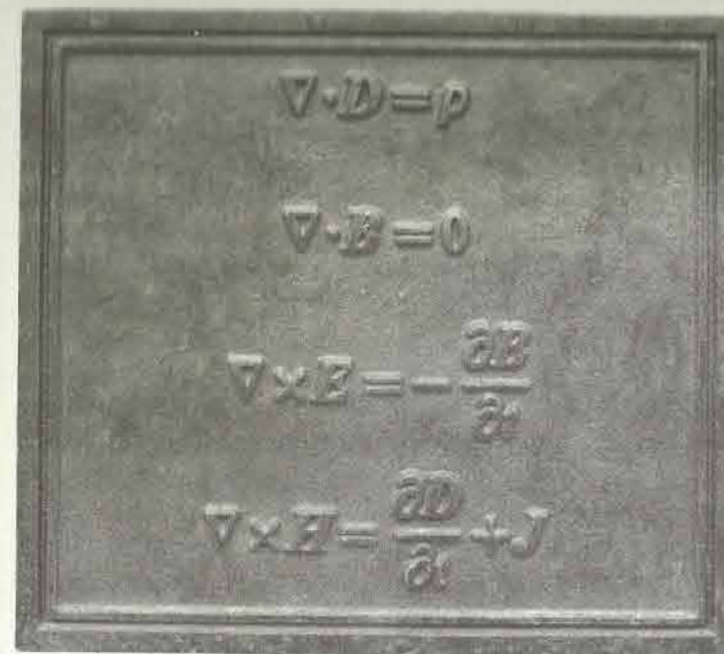
PAUL A. DIRAC



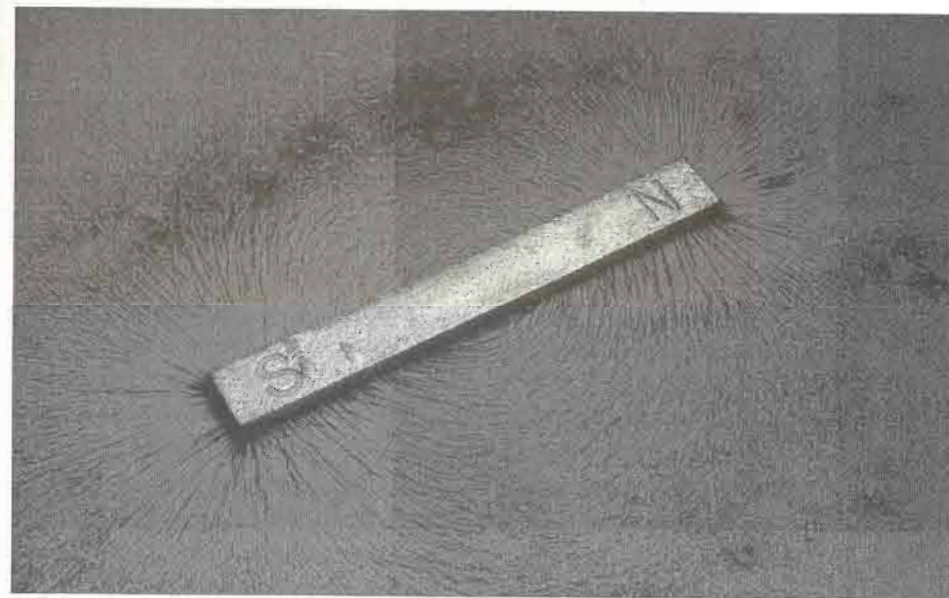
magnéticas se extendían por el espacio alrededor de los imanes y, en general, dada la íntima relación entre los fenómenos eléctricos y magnéticos, alrededor de las corrientes eléctricas. De este modo, Faraday concibió que el espacio vacío alrededor de un conductor por el que circulaba una corriente, o alrededor de un imán, se llenaba de *líneas de campo*. Estas líneas, dibujadas por las limaduras de hierro entre los imanes (véase la imagen inferior de la página contigua), transportaban el campo de fuerzas a través del espacio. Faraday intuyó, también, que dicho transporte no podía ser instantáneo, sino que debía propagarse con alguna velocidad finita, necesitando algún tiempo. Maxwell recogió las ideas de Faraday, y de otros como André-Marie Ampère, formalizándolas matemáticamente en sus famosas cuatro ecuaciones que, de modo brillante y elegante, condensaban todo el electromagnetismo.

Las ecuaciones de Maxwell probaron que el campo electromagnético, visualizado a través de las líneas de campo de Faraday o expresado por una función matemática en todo el espacio, existía y propagaba cualquier perturbación a una velocidad finita, la velocidad de la luz. El campo mediaba la interacción entre cargas o corrientes eléctricas. Si una carga A sentía el campo creado por otra carga B, separadas una determinada distancia, A seguiría percibiendo el mismo campo aun cuando, por ejemplo, B fuera desplazada o suprimida, en tanto que el resultado de la alteración de B no se propagara hasta el punto ocupado por A. El campo estaba, pues, ligado al espacio, al vacío (aunque con anterioridad a Einstein, como hemos explicado, se argumentaba que el misterioso éter llenaba el vacío y transportaba el campo) y, de algún modo, residía por algún tiempo en él aunque las fuentes hubieran sido suprimidas. El campo electromagnético era mucho más que una simple entelequia o una herramienta práctica de visualización. Las cargas llenaban el vacío con los campos que creaban y que, a su vez, eran percibidos por otras cargas que sentían las fuerzas transportadas por el campo.

Esta visión clásica del campo de fuerzas fue completada por la mecánica cuántica. El campo electromagnético se propagaba, como Planck y Einstein habían probado, por medio de pa-



La placa de la izquierda, dedicada a James Clerk Maxwell, se encuentra en Edimburgo; en ella figuran sus célebres ecuaciones. Abajo, líneas de campo magnético para un imán, visualizadas por medio de limaduras de hierro.





quetes discretos de energía, excitaciones del propio campo que transportaban una cantidad elemental de momento, los fotones. En última instancia, como hemos avanzado, la interacción se expresaba como un intercambio de momento entre partículas cargadas, por medio de estos fotones que transferían, cada uno, una cantidad elemental y que, colectivamente, portaban la interacción. Desde esta perspectiva, el campo electromagnético era el resultado de la superposición colectiva de todos los fotones posibles, con todas las frecuencias y energías posibles. Fotones que podían ser virtualmente emitidos y absorbidos por partículas con carga eléctrica, como ya hemos explicado, configurando la interacción electromagnética entre ellas. Fotones que llenaban el vacío, confiriéndole estructura y transportando la interacción. Pero la historia no acababa ahí. El fotón virtual, dependiendo de su energía, también podía producir una pareja formada por una partícula y su antipartícula, también virtuales, porque debían aniquilarse mutuamente para generar de nuevo el fotón virtual, que transferiría el momento elemental en el proceso de interacción, sin que ni este último ni la pareja pudieran ser nunca detectados. Y este fenómeno podía repetirse una y otra vez, hasta el infinito, de suerte que cualquier partícula cargada, un electrón por ejemplo, generaba a su alrededor una nube de partículas y antipartículas cargadas y de fotones virtuales. Dicha nube se extendería virtualmente hasta el infinito, dado que el fotón carece de masa, y ocuparía el vacío.

## CARGAS ELÉCTRICAS, INFINITOS Y SIMETRÍAS

El vacío, como Dirac había intuido, poseía una estructura complicada que adquiriría como resultado de las propias interacciones fundamentales entre partículas elementales. Antes hemos descrito el mecanismo de interacción que emerge de la cuantización del campo electromagnético. La teoría que describe dicha interacción se conoce como electrodinámica cuántica (QED, por sus siglas en inglés) y fue completada de forma independiente por Freeman Dyson, Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger y Ri-

chard Feynman, a finales de los años cuarenta. Los tres últimos compartieron el premio Nobel de Física de 1965 como reconocimiento a su contribución en el desarrollo de una teoría cuántica, consistente con la relatividad especial, para la electrodinámica. En lo que sigue describiremos brevemente los ingredientes básicos y los principales logros de dicha teoría.

Las fuerzas electromagnéticas, como las que mantienen la atracción entre el protón y el electrón que forman un átomo de hidrógeno, están mediadas por el campo electromagnético. Este, cuánticamente, es el resultado de la superposición de todas sus posibles excitaciones elementales o cuantos, también llamados fotones. El formalismo que permite expresar un campo como la superposición de sus cuantos fue propuesto originalmente por Dirac, con el propósito de describir la interacción entre radiación y materia. Este formalismo (a cuyo desarrollo contribuyeron, a lo largo de la década de los treinta, Wolfgang Pauli, Eugene Wigner o Werner Heisenberg, entre otros) transforma un campo clásico en uno cuántico y, por ello, suele recibir hoy el nombre de *segunda cuantización*. En él, los campos que median las interacciones son superposiciones de cuantos o partículas, pero también las partículas que sienten la interacción son cuantos o excitaciones de un campo (la información cuántica de toda partícula está codificada por un campo, su función de onda). Los primeros poseen espín entero, y corresponden a la radiación, las segundas tienen espín 1/2 y representan la materia. Así, la interacción entre la radiación y la materia se expresa formalmente como la interacción entre campos de una y otra naturaleza.

La dinámica de los campos clásicos, es decir, su evolución con el tiempo sometidos a cualesquiera interacciones, era un problema bien conocido y resuelto por la teoría clásica de campos. En el marco del formalismo denominado *lagrangiano*, que extendía la mecánica de Newton a sistemas físicos que podían representarse por campos (como los llamados medios continuos, verbi gracia, los fluidos de los que hablamos en el primer capítulo), se debía proceder construyendo una cierta función de todos los campos involucrados en el problema. Dicha función, integrada sobre todo el espacio y el tiempo, resultaba ser igual a la acción

asignada al sistema. Esta función de los campos se denomina *densidad lagrangiana* y contiene toda la información dinámica del sistema objeto de estudio. En el marco de una teoría cuántica de campos, solo había que completar este procedimiento aplicando el formalismo de segunda cuantización que transformaría los campos clásicos en cuánticos. Aunque «solo» no es sinónimo, de ningún modo, de «sencillamente» o «simplemente». De hecho, es tal el nivel de complejidad para la cuantización del electromagnetismo, que los físicos hubieron de proceder de manera aproximada. Veamos cuál era el origen de la complejidad y cuál fue la aproximación.

El campo creado por una partícula cargada, por ejemplo un electrón, en cualquier punto del espacio es, como se ha explicado antes, el resultado de la superposición de todos los fotones virtuales que, emitidos por ese electrón, pueden alcanzar dicho punto, donde podría ser absorbido por otro electrón, que sentiría el campo creado por el primero. Por tanto, la fuerza electromagnética entre dos electrones resultará de la suma de los efectos de todos esos fotones virtuales, emitidos por uno y absorbidos por el otro. Pero, además, el fotón virtual puede, en su camino, producir una pareja formada por un electrón y un positrón que, más adelante, se aniquilarían entre sí, recuperándose el fotón. También es posible que, antes de aniquilarse, el electrón y el positrón intercambien otro fotón. O que cualquiera de ellos emita y absorba un fotón. Y, de nuevo, cada fotón emitido puede dar lugar a parejas de electrones y positrones, y así sucesivamente. De hecho, cada una de las combinaciones constituye un proceso que, con una probabilidad calculable, contribuye al resultado final. En principio, es necesario considerar todas las infinitas combinaciones posibles y calcularlas. De ahí la enorme complejidad del problema. Afortunadamente, es posible establecer una cierta jerarquía en esta infinidad de contribuciones. Se pueden ordenar atendiendo a lo grande o pequeño que es su efecto, y ello gracias a que este efecto disminuye cada vez que un fotón es emitido o absorbido. La serie de contribuciones, ordenadas de mayor a menor efecto, constituye lo que se conoce como un *desarrollo en perturbaciones*. La aproximación consiste, preci-

samente, en considerar únicamente las contribuciones de mayor efecto, esperando que el efecto global de las infinitas restantes sea lo suficientemente pequeño como para no tener que ocuparse de ellas.

En realidad, la probabilidad de emisión o absorción de un fotón virtual por un electrón depende de la intensidad de la interacción electromagnética, de la intensidad con la que la materia y la radiación se *acoplan*. Esta intensidad se expresa por una cantidad que recibe el nombre de *constante de acoplamiento electromagnética* o *constante de estructura fina*, que se representa con la letra griega  $\alpha$ , y que es una cantidad sin dimensiones físicas, un simple valor numérico sin unidades. Por ello, cuando se evalúa una contribución del desarrollo en perturbaciones, habrá un factor  $\alpha$  por cada dos emisiones o absorciones de un fotón (el número total siempre será par, dado que todo fotón virtual emitido tiene que ser también absorbido). Así, las mayores contribuciones a la fuerza electromagnética entre dos partículas elementales cargadas cuentan con una emisión y una absorción y serán proporcionales a  $\alpha$ ; las que siguen contarán con dos emisiones y dos absorciones y serán proporcionales a  $\alpha^2$ ; las siguientes, a  $\alpha^3$ , y así hasta el infinito. El valor de la constante de acoplamiento (aunque, como veremos más adelante, no es realmente constante) resulta ser muy pequeño: aproximadamente  $1/137$ , justificando, por tanto, que sea posible obtener buenos resultados aun cuando solo se consideren las contribuciones proporcionales a  $\alpha$ , técnicamente denominadas *de primer orden*.

No obstante, hay una objeción a todo lo anterior. Una objeción que, de hecho, se puso ya de manifiesto a finales de los años treinta, cuando los cálculos de Felix Bloch, Arnold Nordsieck y Victor Weisskopf pusieron de manifiesto que en el desarrollo en perturbaciones de cualquier proceso de interacción electromagnética, solo las contribuciones de primer orden eran finitas. Si se evaluaban contribuciones proporcionales a potencias de  $\alpha$  supe-

De las partículas virtuales conocemos la existencia porque podemos medir sus efectos indirectos.

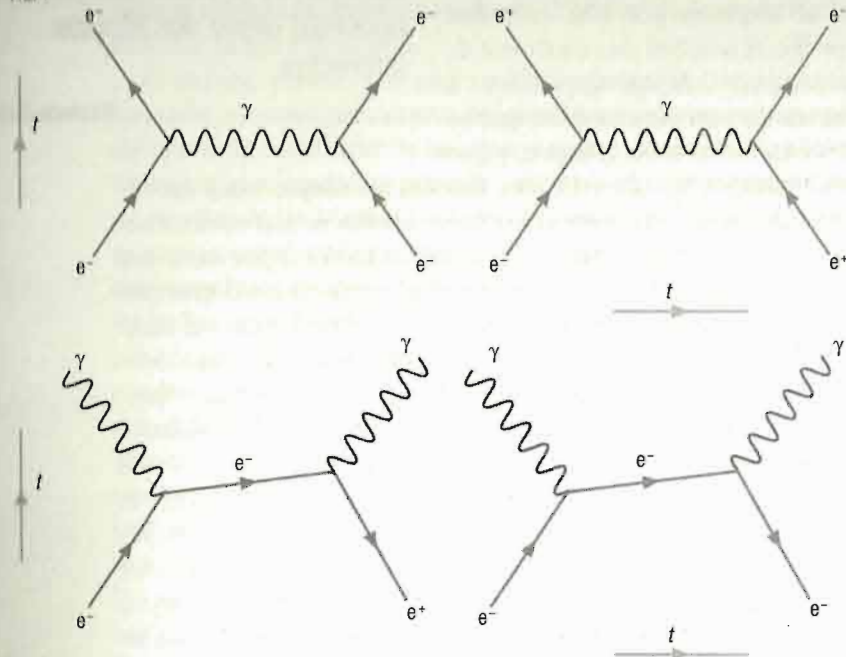
STEPHEN HAWKING



## DIAGRAMAS DE FEYNMAN

Richard Feynman desarrolló una técnica diagramática muy potente e intuitiva con el objeto de representar y calcular cada una de las contribuciones perturbativas para un proceso físico. Su uso se ha extendido y generalizado hasta el punto de convertirse en una herramienta, y casi un lenguaje, de uso común en el ámbito de la física de partículas. Una vez representadas las contribuciones por diagramas, ciertas reglas, llamadas reglas de Feynman, permiten calcular matemáticamente su valor.

FIG. 1

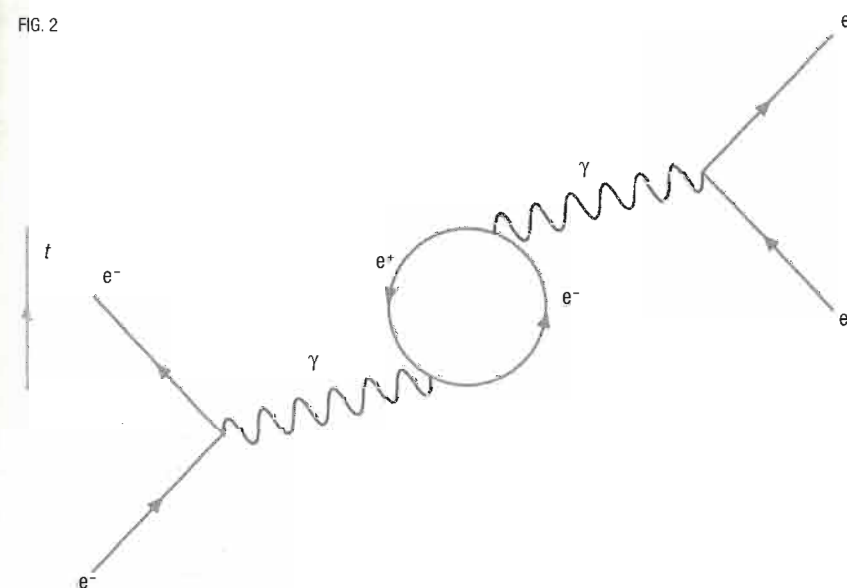


El diagrama superior izquierdo muestra dos electrones que interactúan por medio de un fotón virtual. A la derecha, modificando la flecha del tiempo, el diagrama se lee como la aniquilación de un electrón y un positrón, generándose un fotón que, a su vez, produce un nuevo par de electrón y positrón. El diagrama inferior derecho representa la dispersión de un electrón por un fotón, que aquí es luz real y no virtual: el electrón absorbe el fotón y se «virtualiza» (se conserva el momento pero no la energía), para emitirlo posteriormente. A la izquierda, el cambio de la flecha del tiempo transforma el proceso en una aniquilación de un electrón por un positrón, con la emisión de dos fotones reales (necesarios los dos para la conservación del momento y la energía).

## Cuestión de orden

La técnica diagramática de Feynman permite obtener y representar contribuciones de cualquier orden. En la figura 1, por ejemplo, se representan las contribuciones de primer orden a la probabilidad de ocurrencia de cuatro procesos. La flecha de color gris claro indica el eje y el sentido del flujo de tiempo, es decir la dirección en la que deben leerse los diagramas. El eje perpendicular debe entenderse como espacial. Las líneas rectas indican la propagación de un fermión, con una flecha para el flujo del momento. Si la flecha del fermión apunta en el mismo sentido que la flecha del tiempo (entendiendo por ello que ambas flechas forman un ángulo siempre menor que  $90^\circ$ ), representará una partícula. Si, por el contrario, apunta en un sentido diferente, se tratará de una antipartícula. La línea ondulada representa un fotón. La intersección de una línea fermiónica con un fotón es un vértice que representa el proceso de absorción o emisión de una partícula virtual, es decir, en esencia, representa la interacción. Las líneas externas son partículas reales, que pueden detectarse, y las internas son virtuales, es decir, se trata de partículas que nunca se pueden registrar en un detector. En la figura 2 se muestra una contribución con cuatro vértices, es decir de orden  $\alpha^2$ .

FIG. 2



La figura muestra una contribución de orden  $\alpha^2$  (con cuatro vértices) en la que el fotón virtual produce un electrón y un positrón que se aniquilan para dar, de nuevo, otro fotón virtual.

riores aparecían otros factores que la hacían infinita. Y ocurría así para todas las potencias de  $\alpha$  distintas de 1, también llamadas *órdenes* del desarrollo en perturbaciones. El resultado desconcertó a los físicos. Si aceptaban, como dictaba la mecánica cuántica, que la fuerza entre cargas era portada por las excitaciones elementales del campo, y también admitían que un fotón podía generar una pareja formada por una partícula y su antipartícula, como se infería de imponer la relatividad especial, la teoría resultante producía resultados absurdos: predecía siempre fuerzas infinitas. ¿Era posible que la mecánica cuántica y la relatividad especial se revelaran incompatibles?

El primer paso para la solución al rompecabezas emergió de la intuición de Hans Bethe, que calculó, en 1947, el efecto de los fotones virtuales que pueblan el vacío sobre el electrón del átomo de hidrógeno. Encontró una ligera diferencia dependiendo de que la probabilidad de localizar al electrón, fijada por su estado cuántico, fuera la misma en todas direcciones o no (estableciendo un símil clásico, según la órbita, circular o elíptica, que siguiera el electrón). Esta ligera diferencia había sido medida por Willis Lamb y su estudiante Robert Retherford usando sofisticadas técnicas espectroscópicas, y se conoce hoy como *corrimiento Lamb*. Aunque imperfecto (su descripción del problema no era totalmente compatible con la relatividad especial), el cálculo de Bethe coincidía con las medidas experimentales. Sin embargo, para soslayar el problema de los infinitos, Bethe recurrió a una brillante artimaña: cuando encontraba una contribución infinita, la incorporaba a la definición de la carga o la masa del electrón, cuyos valores, incluidas todas estas contribuciones, eran constantes fundamentales que debían medirse experimentalmente. Así pues, las propiedades del electrón, en la realidad física accesible a la experiencia, se obtenían de la suma de todas las contribuciones infinitas al simple proceso de propagación del mismo o al de su interacción con otra partícula por medio de la emisión de un fotón. De ese modo, fruto de esta redefinición de las propiedades físicas del electrón, podían sustraerse todos los infinitos que emergían en el cálculo de la probabilidad para cualquier proceso físico y en cualquier orden

del desarrollo en perturbaciones, quedando solo las contribuciones finitas.

La formulación cuántica de la interacción electromagnética totalmente compatible con la relatividad especial fue desarrollada por Dyson, Schwinger, Feynman y Tomonaga. En el electromagnetismo de Maxwell, los mismos campos electromagnéticos podían derivarse de un conjunto infinito de potenciales relacionados entre sí por una suerte de transformaciones que se dio en llamar *transformaciones gauge*. Ilustremos la idea con

un ejemplo sencillo. Como ya se comentó, el campo eléctrico se obtiene a partir de las variaciones del potencial eléctrico, pero aquel no depende del valor absoluto de este ni del origen de potencial (punto o región del espacio en el que su valor es cero), que suele definirse para fijar dicho valor absoluto. Por tanto, el campo eléctrico permanecerá inalterado por un cambio arbitrario del origen de potencial. Del mismo modo, los campos y las fuerzas electromagnéticas serán los mismos aun cuando los potenciales puedan ser modificados de manera continua siguiendo ciertas reglas de transformación. Esto es lo que los matemáticos llaman una *simetría*. Una pelota lisa y perfectamente esférica es *simétrica bajo rotaciones* porque el estado en que queda al efectuar sobre ella un giro con cualquier ángulo respecto a cualquier eje que pase por su centro es idéntico al de partida. Si perdemos de vista la pelota mientras rota, la apariencia de la pelota en su estado final no nos servirá para saber cuánto y cómo ha rotado. Una simetría expresa, por tanto, una invariancia frente a algún tipo de transformación. Así, las ecuaciones de Maxwell eran invariantes frente a transformaciones gauge o respetaban una simetría gauge. También eran invariantes frente a las transformaciones de Lorentz (es decir, consistentes con la relatividad especial) o respetaban la simetría de Lorentz. Los trabajos llevados a cabo por los mencionados autores entre 1946 y 1950 probaron que exigien-

No hemos encontrado nada equivocado en la teoría de la electrodinámica cuántica. Por tanto, yo diría que es la joya de la física.

RICHARD P. FEYNMAN



do estas dos simetrías para los campos fermiónicos, que representan la materia, y para los bosónicos, que representan la radiación, se obtenía la densidad lagrangiana de la electrodinámica. Esta podía cuantizarse como hemos explicado y, precisamente gracias a estas simetrías, podía aplicarse sistemáticamente y sin ninguna ambigüedad el procedimiento sugerido por Bethe. Procedimiento, conocido como *renormalización*, que juega un papel esencial en toda TCC, y por medio del cual la definición de parámetros físicos, como la masa o la carga del electrón, absorben los infinitos de la teoría que el desarrollo en perturbaciones pone de manifiesto.

Siguiendo este esquema, la electrodinámica cuántica emergió como una teoría cuántica de los campos relativistas que describen la materia, la radiación y sus interacciones, inducidas por la carga eléctrica. Y se convirtió, además, en el modelo para la formulación de otras interacciones fundamentales entre partículas elementales, como las nucleares. El refinamiento alcanzado hoy en el uso de esta teoría es tal que, por ejemplo, puede calcularse el corrimiento Lamb con una precisión superior a una parte en un millón, obteniéndose un resultado que concuerda magníficamente con las medidas experimentales, y pueden calcularse también otras cantidades incluso con mayor precisión e igual conformidad con los experimentos.

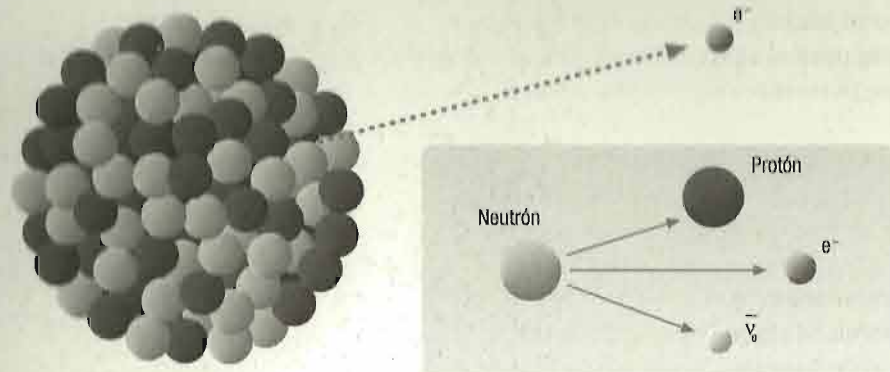
## La fauna subnuclear y la vía óctuple

El pion postulado por Yukawa fue la primera de muchas otras nuevas partículas subnucleares, descubiertas en los años cincuenta del siglo xx, y que constituyeron una fauna inextricable. La aplicación de la teoría de grupos y de la simetría como principio organizador permitió ordenarlas y puso de manifiesto su estructura subyacente.

En la década de los cuarenta, la comprensión de la estructura última de la materia que habían adquirido los físicos les llevaba a postular la existencia de cuatro tipos de ladrillos elementales. Tres de ellos, protón, neutrón y electrón, habían sido descubiertos experimentalmente; el cuarto, el neutrino, era una partícula esquiva que había sido propuesta por Pauli para justificar la naturaleza singular de las desintegraciones nucleares débiles (figura 1) y no sería descubierta hasta 1956. Las cuatro partículas eran fermiones, poseían espín  $1/2$ , y por ello se suponía que eran constituyentes elementales de la materia. Obedecían al principio de exclusión de Pauli y, al formar estados ligados multifermiónicos, cada uno adoptaba un número cuántico diferente, haciendo posible la ocupación de niveles cuánticos que era característica de la materia. Protón y neutrón sentían la fuerza nuclear fuerte y formaban estados ligados que originaban el núcleo atómico. No así el electrón y el neutrino. El electrón se ligaba al núcleo —por medio de las fuerzas electromagnéticas que sentía en proporción a su carga eléctrica, al igual que el protón— formando átomos. El neutrino, sin carga eléctrica, solo interaccionaba con las otras tres partículas por medio de las fuerzas nucleares débiles.



FIG. 1



Radiación beta negativa de un núcleo y la reacción de desintegración del neutrón que la origina.

En cuanto al «cemento» de la materia, las interacciones fundamentales, la electrodinámica cuántica había emergido, al final de la década, como la teoría cuántica de campos relativistas para el electromagnetismo. En esta, se explicaban las fuerzas entre cargas como resultado del intercambio de fotones, los cuantos del campo electromagnético. Previamente, en 1935, Yukawa había postulado la existencia de un campo que se acoplaba a los campos fermiónicos del protón y el neutrón, para explicar así la fuerza nuclear fuerte. Los cuantos de ese campo eran los piones, que fueron detectados experimentalmente en 1947. Pion y fotón eran bosones, con espín nulo el primero y espín 1 el segundo, mediadores, respectivamente, de las fuerzas nuclear fuerte y electromagnética.

En esencia, bosones y fermiones diferían, por su espín entero o semientero, a causa de una simetría cuántica: la función de onda que describía un estado de múltiples fermiones únicamente debía cambiar de signo cuando dos de ellos eran permutados; si el sistema estaba formado por bosones, la función de onda no cambiaba. Ilustremos con un ejemplo sencillo esta propiedad de los sistemas cuánticos. Consideremos dos fermiones, que desig-

naremos como 1 y 2, y que pueden ocupar dos niveles cuánticos posibles, con funciones de onda monoparticulares (que describen el estado de una sola partícula),  $\varphi_A$  y  $\varphi_B$  (fi). La función de onda para el sistema de dos fermiones, atendiendo a la simetría bajo permutación, debería escribirse como:

$$\varphi_A(1)\varphi_B(2) - \varphi_A(2)\varphi_B(1),$$

combinación que, como puede comprobarse inmediatamente, cambia de signo bajo el intercambio de las partículas 1 y 2. En el caso de bosones, la combinación sería:

$$\varphi_A(1)\varphi_B(2) + \varphi_A(2)\varphi_B(1).$$

Se dice que la función de onda es antisimétrica frente a permutaciones para los fermiones y simétrica para los bosones.

En el caso de que dos fermiones ocuparan el mismo estado, con los mismos números cuánticos, su permutación conduciría a un sistema idéntico al anterior a la permuta, aunque descrito por una función de onda con signo opuesto al inicial. Por tanto, la función de onda del sistema tiene que ser igual a su opuesta, en cuyo caso solo puede ser idénticamente nula, no correspondiendo a ningún estado físico. Este fenómeno queda claramente ilustrado por el anterior ejemplo, donde la función de onda para los dos fermiones resultará ser nula si A y B son el mismo estado. Por esa razón, en los sistemas con múltiples fermiones, cada uno de ellos debía distinguirse de los demás en algún número cuántico. Así se explicaba el principio de exclusión de Pauli para los fermiones.

Resumiendo, toda la materia que compone nuestro universo parecía obtenerse por combinación de fermiones de tres tipos; un cuarto tipo intervenía en las reacciones dominadas por las fuerzas débiles. Se ligaban fundamentalmente por la acción de

dos fuerzas, la electromagnética, mediada por fotones, y la nuclear fuerte, mediada por piones. ¿Eso era todo?

## LA FAUNA SUBNUCLEAR

El minucioso examen de la radiación cósmica que bombardea continuamente la Tierra desde el espacio exterior había permitido a Cecil Powell, en 1947, identificar una partícula de propiedades parecidas a las del pion de Yukawa. Pero el pion no llegó solo. En el mismo año, y de nuevo a partir de sucesos producidos por los rayos cósmicos, George Dixon Rochester y Clifford Charles Butler descubrieron una partícula similar al pion pero más pesada que él, lo suficiente como para desintegrarse en dos o, incluso, tres piones. Y, antes incluso, en 1936, otra partícula se unió a la fiesta sin invitación, cuando Carl David Anderson y Seth Neddermeyer descubrieron, una vez más analizando la radiación cósmica, una partícula con la misma carga negativa del electrón pero unas 200 veces más pesada. Partícula que, sin embargo, resultó ser un fermión y no sentir la fuerza nuclear fuerte, de modo que no encajaba como candidata a ser la sugerida por Yukawa. La primera recibió el nombre de mesón K o *kaón*, y esta última, el de mesón  $\mu$  (mu) o *muon*. En realidad, acabarían apareciendo cuatro kaones:  $K^+$ , con carga positiva igual a la del protón, y su antipartícula  $K^-$ , y el kaón neutro  $K^0$  y su antipartícula  $\bar{K}^0$ . Del mismo modo, también aparecerían tres piones,  $\pi^+$  y su antipartícula  $\pi^-$ , cargados positiva y negativamente, y el pion neutro  $\pi^0$ , que resultó ser su propia antipartícula. En general, todas las partículas serán neutras o poseerán un múltiplo entero de la unidad de carga elemental (la del electrón o la del protón), con el signo indicado por el superíndice. El nombre genérico de *mesón* había sido acuñado para referirse a partículas con una masa intermedia entre el electrón y el protón que, como había sugerido Yukawa, eran portadoras de la interacción fuerte. Piones y kaones pertenecían a esta categoría. El muon, en cambio, no. Era una réplica del electrón, aunque mucho más masivo, y también poseía una antipartícula que replicaba al positrón.

Así, el panorama que la física de partículas ofrecía al inicio de la década de 1950 era aún sencillo. La paleta de ingredientes elementales seguía siendo singularmente simple. Solo tres fermiones se combinaban para producir más de un centenar de especies químicas, aunque la existencia del muon, la copia masiva del electrón, resultaba algo inquietante. Otro tanto podía decirse de la proliferación de mesones aparecidos del escrutinio de los rayos cósmicos.

¿Quién ha pedido *eso*?

ISIDOR I. RABI ANTE EL DESCUBRIMIENTO DEL MUON

¿Por qué esa variedad de mesones?

Todos ellos con espín 0 y distinguiéndose por su carga eléctrica o su masa. Todos inestables, viviendo antes de desintegrarse brevísimos intervalos de tiempo, que podían variar entre unas pocas cienmillonésimas de segundo, en el caso de los piones cargados, y poco menos de unas cien trillonésimas de segundo, como el pion neutro.

Sin embargo, conforme la década avanzaba, la inquietud daría paso al desconcierto, al tiempo que la sencillez del panorama se desvanecía. El escrutinio de los rayos cósmicos continuó depurando descubrimientos de más mesones, como las partículas  $\eta$  (eta) y  $\eta'$ , algunos con espín entero igual a 1, como el mesón  $\rho$  (rho). Pero lo que resultó más inesperado fue que, como fruto de experimentos de dispersión de piones por nucleones, apareció también un nuevo grupo de fermiones con espín 3/2 y una masa aproximadamente un 25% mayor que la de los nucleones: las partículas  $\Delta$  (delta), de las que se hallarían cuatro, a saber,  $\Delta^{++}$ ,  $\Delta^+$ ,  $\Delta^0$  y  $\Delta^-$ , que se distinguían por su carga eléctrica, indicada, como en el caso de los piones o los kaones, por el superíndice. Igualmente inestables, vivían un lapso de tiempo aún más corto que los piones neutros, casi cien cuatrillonésimas de segundo. Y, al desintegrarse, de nuevo dejaban tras de sí un pion y un nucleón. Una observación que cabía hacerse en este punto es que, si como resultado de la colisión de un protón y un pion el resultado era una partícula  $\Delta$  o, al revés, esta última podía «romperse» en un protón y un pion, entonces la partícula  $\Delta$  quizá no fuera elemental. Pero ¿y el protón? ¿Era el protón una partícula elemental?



Los físicos de partículas perseveraron en sus experimentos de dispersión. La relatividad especial había mostrado que, de algún modo, la energía y la masa eran interconvertibles. Las partículas se desintegraban produciendo otras partículas y, en muchos casos, también fotones, es decir, radiación. La energía de

Prefiero tener preguntas que no pueden ser respondidas a respuestas que no pueden ser preguntadas.

RICHARD P. FEYNMAN

las partículas finales, calculada con la ecuación de Einstein, que tenía en cuenta su masa y la energía cinética asociada a su cantidad de movimiento, tenía que ser igual a la de la partícula inicial. Lo mismo ocurría con las partículas antes y después de una colisión. Para producir partículas más y

más masivas y, por tanto, muy energéticas, era necesario elevar la energía de los proyectiles, acelerándolos para incrementar su cantidad de movimiento. A mayor velocidad, mayor energía disponible para producir una nueva partícula más masiva como resultado de colisiones. De ese modo, los físicos experimentales de partículas continuaron descubriendo más y más fermiones con mayor masa que los nucleones. Todos ellos, incluidos el protón y el neutrón, recibieron el nombre genérico de *bariones*, para distinguirlos del electrón, el muon y el neutrino, mucho más ligeros y que pasaron a conocerse como *leptones*. Además de por su masa, los últimos diferían claramente de los primeros por su insensibilidad a la fuerza nuclear fuerte. Las partículas que sí la sentían, bariones y mesones, se agruparon en una nueva familia y recibieron el nombre genérico de *hadrones*. Se había pasado de la sencillez elemental de década de 1940 a un verdadero galimatías de nuevas y variadas partículas que, en los cincuenta, empezaban a conformar una sopa indescifrable de letras griegas.

## ORDEN Y EXTRAÑEZA

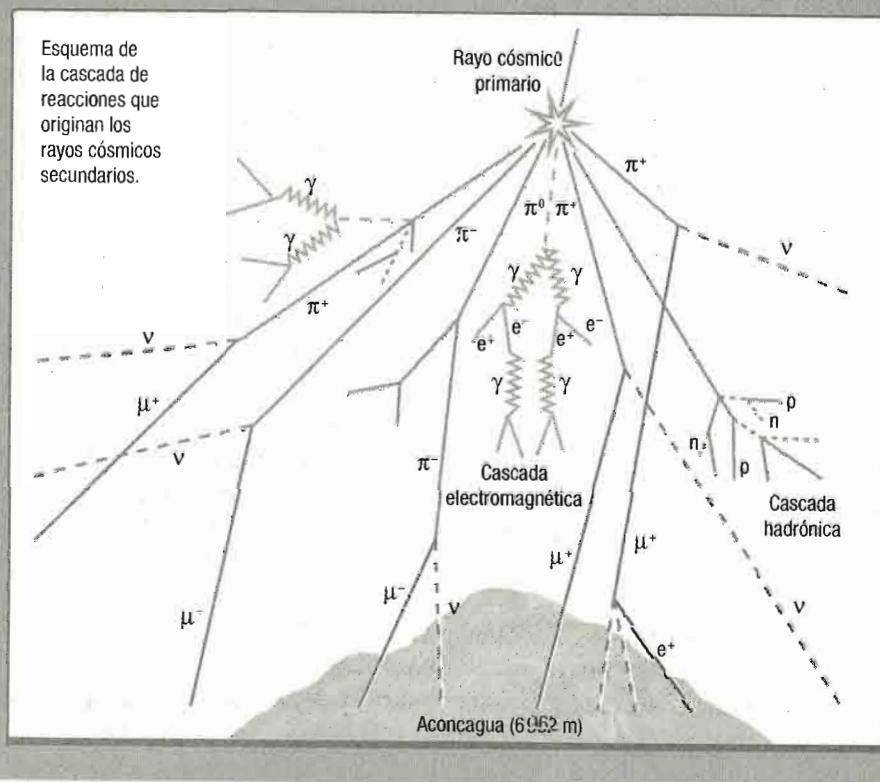
Si el hallazgo de las partículas  $\Delta$  podía considerarse como inesperado, «extraño» era el adjetivo apropiado para calificar la aparición de otro nuevo conjunto de bariones, también en la década

## LOS RAYOS CÓSMICOS

Los rayos cósmicos están provocados por núcleos desnudos de electrones y extremadamente energéticos (desde 1 000 hasta 1 000 billones de MeV) que, permanentemente, bombardean la Tierra desde el espacio. El origen de esos núcleos es aún incierto. Se piensa que el núcleo activo de la galaxia o estrellas masivas en su fase de supernova pueden ser sus principales fuentes, externas al sistema solar.

## Reacciones en cascada

Los núcleos energéticos (el 99% son protones y partículas alfa) constituyen el rayo cósmico primario que colisiona con núcleos atmosféricos, principalmente oxígeno y nitrógeno. Fruto de estas colisiones, y de la energía transportada por el rayo primario, se produce una cascada de nuevas partículas que constituyen los rayos cósmicos secundarios. Entre ellas hay muones y neutrinos o fotones, productos de la desintegración de los piones cargados o neutros, y una cascada de hadrones producidos por la cadena de colisiones sucesivas con núcleos atmosféricos a partir del rayo primario. Muchas de estas partículas alcanzan la superficie de la Tierra.



de 1950. Estas partículas siguieron siendo bautizadas con letras griegas, como las  $\Sigma^+$ ,  $\Sigma^0$ ,  $\Sigma^-$ ,  $\Xi^+$ ,  $\Xi^0$  o  $\Lambda$  (sigma, xi y lambda), cuya masa excedía la de los nucleones entre un 20% y un 30% y que, como estos, poseían espín 1/2. Aparecerían también otros bariones con espín 3/2, más pesados que las partículas  $\Delta$  e igualmente extraños. ¿En qué consistía su «extrañeza»? Para entender el comportamiento anómalo de estas partículas extrañas, debemos saber un poco más de todas ellas. De sus propiedades y de cómo se desintegran.

Empecemos por los nucleones. El protón es solo levemente más ligero que el neutrón. Sus masas difieren en poco más de un uno por mil. Son prácticamente iguales. Tal semejanza no puede ser casual. En la década de 1930, poco después del descubrimiento del neutrón, Werner Heisenberg interpretó esta semejanza en términos de simetría. Sugirió que, dado que protón y neutrón eran casi idénticos (salvo por su carga eléctrica) y sentían la fuerza nuclear fuerte, esta última debía ser invariante frente a la transformación consistente en permutar protones y neutrones. En términos más técnicos, diríamos que las partículas tienen una propiedad o número cuántico análogo al espín, que pasó a denominarse *isospín*, cuyas dos componentes o proyecciones correspondían al protón y al neutrón. Transformaciones que operaban en el espacio abstracto de isospín (análogo al espacio espinorial o de espín del que hablamos en el capítulo anterior) podían transmutar unas componentes en las otras, y la interacción fuerte era invariante bajo dichas transformaciones. Esta simetría recibió el nombre de *simetría de isospín*.

Las transformaciones de simetría de isospín tienen una estructura bien conocida y estudiada por una rama de la matemática denominada teoría de grupos. Forman un *grupo de Lie*. Nos contentaremos aquí con citar su nombre e indicar simplemente que la teoría de grupos proporciona una potente herramienta para el estudio y clasificación de las partículas en conjuntos de estados o componentes conectados por transformaciones de simetría, que suelen denominarse genéricamente *multipletes*. Y retengamos, como idea esencial, que el origen de esta simetría está en el hecho de que las partículas que forman estos multipletes se

comportan de manera idéntica en lo que respecta a la interacción nuclear fuerte. Podemos intercambiarlas sin que ninguna de las consecuencias de esta interacción se vea alterada. Si la fuerza nuclear fuerte fuera la única de la naturaleza, el mundo sería exactamente igual antes y después del intercambio. Y si la simetría de isospín fuera exacta, es decir, respetada por todas las fuerzas de la naturaleza, todas las partículas de un multiplete tendrían exactamente la misma masa.

El número de componentes de un multiplete depende del valor del número cuántico de isospín, que representaremos como  $I$ . Al igual que en el caso del espín, el isospín puede visualizarse como un vector que admite solo algunas posibles proyecciones sobre un eje. En general, el número de valores posibles para la proyección va desde  $-I$  hasta  $I$ , de uno en uno. Cada posible valor caracterizará una de las componentes del multiplete. Así, para  $I=1/2$ , existirán dos proyecciones posibles, con valores  $+1/2$  y  $-1/2$ , y dos componentes. Para  $I=1$ , las tres componentes posibles corresponden a las proyecciones  $-1$ ,  $0$  y  $1$ . Y así sucesivamente. Siguiendo este esquema, las partículas con masa próxima podían agruparse y ser ordenadas en multipletes de diferente isospín. El protón y el neutrón formarían un multiplete de isospín  $I=1/2$ , al igual que  $\Xi^-$  y  $\Xi^0$ . Las tres  $\Sigma$  formarían un multiplete para  $I=1$ , y las cuatro  $\Delta$  uno de  $I=3/2$ . El mismo esquema podía aplicarse a todos los hadrones, como puede verse en las siguientes tablas, que ilustran los multipletes para diferentes valores de isospín.

LOS OCHO MESONES CON ESPÍN 0 MÁS LIGEROS				
Mesón (espín = 0)	Isospín ( $I$ )	Extrañeza ( $S$ )	Carga ( $e$ )	Masa (MeV)
$\pi^+$ , $\pi^-$ , $\pi^0$	1	0	+1, -1, 0	139,7; 139,7; 135,0
$\eta$	0	0	0	547,9
$K^+$ , $K^0$	1/2	1	+1, 0	493,7; 497,6
$K^-$ , $\bar{K}^0$	1/2	-1	-1, 0	493,7; 497,6



LOS OCHO BARIONES CON ESPÍN 1/2 MÁS LIGEROS				
Barión (espín = 1/2)	Isospín (I)	Extrañeza (S)	Carga (e)	Masa (MeV)
p, n	1/2	0	+1, 0	938,3; 939,6
$\Lambda^0$	0	-1	0	1115,7
$\Sigma^+, \Sigma^-, \Sigma^0$	1	-1	+1, -1, 0	1189,4; 1197,5; 1192,6
$\Xi^-, \Xi^0$	1/2	-2	-1, 0	1321,7; 1314,9

LOS DIEZ BARIONES CON ESPÍN 3/2 MÁS LIGEROS				
Barión (espín = 3/2)	Isospín (I)	Extrañeza (S)	Carga (e)	Masa (MeV)
$\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$	3/2	0	+2, +1, 0, -1	1232
$\Sigma^{*+}, \Sigma^{*0}, \Sigma^{*-}$	1	-1	+1, 0, -1	1382,8; 1383,3; 1387,2
$\Xi^{*-}, \Xi^{*0}$	1/2	-2	-1, 0	1535,0; 1531,8
$\Omega^-$	0	-3	-1	1672,5

Todos los hadrones, salvo el protón, son inestables y se desintegran en intervalos de tiempo muy breves, que dependen de la naturaleza de su reacción de desintegración. Estas reacciones son un caso particular de reacciones entre partículas. En todas ellas debe conservarse tanto la energía como la carga eléctrica. Por ejemplo:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu,$$

donde el pion cargado positivamente se desintegraba en un antimuón (también con carga positiva) y un neutrino, del mismo modo que el neutrón decaía en un protón, un electrón y un antineutrino (la antipartícula del neutrino):

$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}.$$

Esta última reacción estaba en la base de las desintegraciones nucleares débiles que, en década de 1930, había descrito Fermi, después de que Pauli sugiriera la existencia del neutrino como un elemento esencial en este tipo de desintegraciones. Igualmente, la desintegración del pion cargado era el resultado de interacciones débiles, como resultaba patente por la emisión de un neutrino. Ello explicaba por qué el pion vivía un tiempo relativamente largo, unas pocas cienmillonésimas de segundo, en comparación con las trillonésimas o cuatrillonésimas de segundo de otras partículas, como las  $\Delta$ . Estas, por ejemplo, se desintegraban del siguiente modo:

$$\Delta^- \rightarrow n + \pi^-,$$

por la acción de la fuerza nuclear fuerte, mucho más intensa que la débil. La probabilidad de ocurrencia de un proceso de desintegración crece con la intensidad de la fuerza que lo gobierna, siendo el tiempo necesario, en promedio, para dicha desintegración inversamente proporcional a la probabilidad. Así, el tiempo de vida de las partículas que decaen vía interacción fuerte es muchísimo más corto que el de aquellas cuyo único canal de desintegración se debe la fuerza nuclear débil.

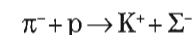
Además de la energía, la cantidad de movimiento y la carga eléctrica, se conservaba también el número de bariones y leptones antes y después de la reacción. De hecho, técnicamente, se define la conservación de una propiedad denominada *número bariónico*, que se calcula asignando un 1 por cada barión, un -1 por cada antibarión y un 0 para el resto de partículas. Lo mismo se aplica para el *número leptónico*. Por ejemplo, en la desintegración del pion cargado, cuya reacción hemos ilustrado antes, la partícula inicial es un mesón, con números bariónico y leptónico iguales a 0, y se desintegra en un antimuón y un neutrino, cuyos números bariónicos son ambos 0 y los leptónicos son, respectivamente, -1 y 1, sumando también 0. En el caso de la desintegración del neutrón, también explicada antes, el número bariónico es 1 antes y después de la reacción, y el leptónico

es 0. Y lo mismo ocurre para la desintegración de la partícula  $\Delta$ . En el primer caso, la masa del pion es unas ocho veces menor que la del barión más ligero (el protón), haciendo imposible un canal de desintegración espontáneo que implique producción de bariones. Por ello, al producirse únicamente leptones en el estado final, el decaimiento no puede ser gobernado por la interacción fuerte (que no afecta a los leptones). En los otros dos ejemplos, la conservación del número bariónico exige el decaimiento de un barión en otro barión más ligero: el neutrón en un protón y la partícula  $\Delta$ , en un neutrón.

¿De qué depende que una desintegración esté gobernada por la fuerza nuclear fuerte o débil? Dentro del mismo multiplete, la desintegración de unas partículas en otras estaría prohibida por la simetría de isospín, de ser esta exacta. Y no se producirá vía interacción fuerte, por respetar esta la mencionada simetría. En cambio, las interacciones débiles la rompen y, precisamente por ello, el neutrón decae en un protón, bajo la acción de la fuerza nuclear débil. El neutrón invierte en desintegrarse, en promedio, unos 886 segundos. La razón de un tiempo tan extremadamente largo, comparado con las cienmillonésimas de segundo del pion cargado, está en la pequeñísima diferencia de masa entre el neutrón y el protón. A mayor diferencia de masas entre el estado inicial y final, más rápido será el decaimiento, aunque, en ambos casos, estén gobernados por la fuerza nuclear débil. El barión  $\Delta$ , en cambio, no pertenece al mismo multiplete que el neutrón y nada impide que pueda decaer en él, vía interacción fuerte, con una vida más de un billón de veces más corta que la del pion. ¿Y los bariones extraños  $\Sigma$ ,  $\Lambda$  o  $\Xi$ ? Su rareza radica precisamente en que, aun no perteneciendo al multiplete de los nucleones, solo decaían a neutrones o protones en tiempos de desintegración compatibles con la interacción débil. Por ejemplo, la  $\Sigma^-$  se desintegraba en neutrones y piones, pero lo hacía en un tiempo cien billones de veces mayor que la  $\Delta^-$ . Lo mismo ocurría con la  $\Lambda$ , cuya vida media era del mismo rango que la del pion cargado, que decaía débilmente. ¿Por qué?

La respuesta correcta a este enigma la dieron, independientemente, Murray Gell-Mann y Kazuhiko Nishijima, quienes pro-

pusieron la existencia de un nuevo número cuántico que debía combinarse con el isospín y que, como los números bariónicos y leptónicos, debía conservarse en las interacciones fuertes. Denominaron *extrañeza* a este número cuántico y emplearon la letra  $S$  para representarlo. Básicamente, asignaron un valor  $S=0$  para todos los bariones que podían decaer en nucleones vía interacción fuerte y dieron distintos valores enteros a todas las partículas extrañas, en función de cómo se producían y se desintegraban (véanse las tablas de las págs. 103-104). Por ejemplo, dado que la siguiente reacción:



producía partículas extrañas en las colisiones a altas energías de piones y protones vía interacción fuerte, se asignó el valor  $S=1$  a  $K^+$  y  $S=-1$  a  $\Sigma^-$ , de suerte que la extrañeza resultara nula antes y después de la reacción. De modo análogo, se asignó la extrañeza para el resto de hadrones.

Dentro de este esquema, la conservación del número cuántico  $S$  en los procesos gobernados por la interacción fuerte, prohibía la desintegración de los bariones  $\Sigma$  (con  $S=-1$ ) en nucleones (con  $S=0$ ) y convertía al barión extraño más ligero, la  $\Lambda$ , en una partícula que únicamente podía desintegrarse vía interacción débil, como los piones cargados. Con la introducción de la extrañeza se daba cuenta de toda la fenomenología observada en las reacciones con partículas extrañas.

### «TRES QUARKS PARA MUSTER MARK»

La simetría de isospín había permitido agrupar los hadrones en multipletes, ordenados por la proyección del isospín. La introducción del número cuántico de extrañeza sugirió, de manera inmediata, que debía ser posible generalizar este esquema y ordenar los hadrones dentro de multipletes mayores que incorporaran el nuevo número cuántico. Para ello, fue necesario



emplear de nuevo la teoría de grupos, definiendo nuevas transformaciones de simetría que generaran esos nuevos multipletes que pudieran acomodar un número mayor de hadrones. El primer problema consistía en identificar estos grupos mayores de hadrones, todos ellos con masas suficientemente parecidas. En el caso del isospín, las masas variaban muy poco para las partículas de cada multiplete. Por ejemplo, las cuatro  $\Delta$  tenían una masa de 1232 MeV, y el rango de masas de las tres  $\Sigma$  iba de 1189 a 1197 MeV. Sin embargo, no resultaba igual de fácil integrar los multipletes, a su vez, en estructuras mayores, dada la dispersión de sus masas.

Finalmente, hacia 1960, Gell-Mann y el físico israelí Yuval Ne'eman resolvieron el puzzle. Combinando adecuadamente los número cuánticos de extrañeza y de isospín y usando las técnicas de la teoría de grupos, acomodaron todos los hadrones descubiertos hasta la fecha en los multipletes asociados a un grupo de Lie que se representa como SU(3). En particular, uno de esos multipletes cuenta con ocho elementos y recibe el nombre de *octete*. De acuerdo con Gell-Mann y Ne'eman, se alojaron en un octete todos los bariones conocidos con espín 1/2, a saber, los dos nucleones, las tres  $\Sigma$ , las dos  $\Xi$  y la  $\Lambda$ , con un rango de masas que iba desde los 938 MeV del protón a los 1321 MeV de la  $\Xi^-$ . Análogamente, los mesones entonces conocidos también se ordenaban en un octete y un singlete (un único estado al que no afectan las transformaciones de simetría). El octete y el número ocho desempeñaron un papel tan relevante en la resolución del puzzle hadrónico, con la ayuda de la teoría de grupos y del grupo SU(3), que los físicos de partículas bautizaron esta sistematización como «vía óctuple», en referencia al camino budista de ocho virtudes para la elevación desde el sufrimiento a la perfección del nirvana.

Más allá del octete, las partículas  $\Delta$  se integraban, junto con otros cinco bariones de espín 3/2, en un multiplete de diez elementos, denominado decuplete. Nueve bariones de diez. Faltaba uno. Armados con la teoría de grupos y con el principio ordenador que emergía del grupo SU(3), los físicos pudieron predecir las propiedades del barión que aún no habían podido detectar. Si la teoría de Gell-Mann y Ne'eman era correcta, el último ba-

rión del decuplete tenía que existir en la naturaleza con espín 3/2, una extrañeza  $S = -3$  y una masa aproximada de 1670 MeV. Los laboratorios experimentales de todo el mundo iniciaron, a principios de la década de los sesenta, una frenética carrera por hallar la pieza que faltaba y que confirmaría la validez de la vía óctuple para la racionalización del mundo de los hadrones. En 1964, los físicos estadounidenses del Brookhaven National Laboratory de Long Island (Nueva York) cobraron la codiciada pieza. Sus detectores de partículas identificaron un barión de 1672 MeV que reunía todos los requisitos: la partícula  $\Omega^-$ .

Las transformaciones de simetría que conforman el grupo SU(3) establecían los multipletes en los que encajaban, como un guante en una mano, los hadrones descubiertos y por descubrir. Sin embargo, la dispersión de las masas de las partículas acomodadas en cada multiplete era mayor que para el caso del isospín. Por ejemplo, el rango de variación de las masas para los octetes bariónico y mesónico era de unos 400 MeV. De esto debía deducirse que la simetría SU(3) estaba lejos de ser exacta en la naturaleza. Tampoco la simetría de isospín era exacta, pero la aproximación era más burda en el caso de SU(3). Pero ¿en qué consistían esas transformaciones de simetría en la naturaleza?

Recordemos que las transformaciones de simetría de isospín, cuyo grupo de Lie se representa como SU(2), habían tenido su origen en la idea de Heisenberg, a principios de década de 1930, de que la fuerza nuclear fuerte podía ser invariante frente al intercambio de neutrones y protones. Aplicando esa idea, todos los hadrones parecían ordenarse en multipletes dictados por transformaciones del mismo tipo, es decir, que implicaban el intercambio de dos elementos de naturaleza distinta. Pero ¿por qué? ¿Cuál era la razón profunda de la existencia de esta simetría que parecía ordenar los hadrones? De manera abstracta, podía pensarse que los multipletes de isospín podrían ser el resultado de que los hadrones poseyeran algún tipo de estructura interna que fuera invariante, o aproximadamente invariante, frente al in-

Si fuera capaz de recordar el nombre de todas estas partículas habría sido botánico.

ENRICO FERMI



tercambio de dos entidades que los conformaban. Ahondemos más en esta idea.

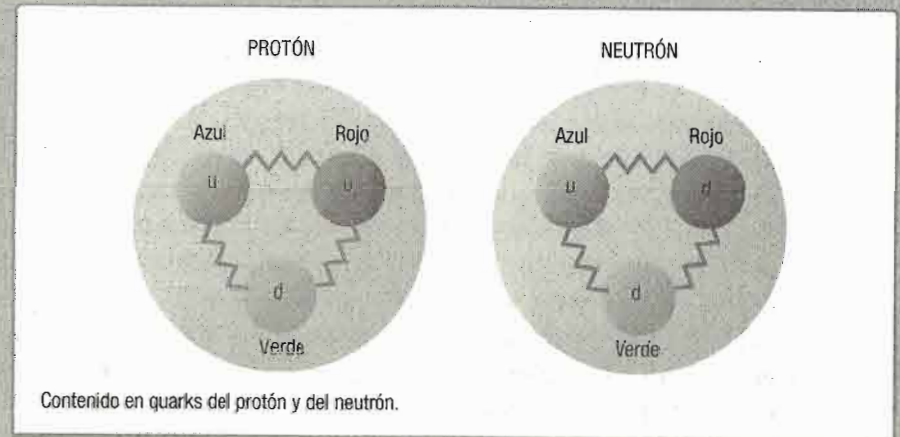
¿Qué propiedades físicas tendrían que tener estas entidades constituyentes de los hadrones? En principio, debían tener espín  $1/2$  para, de ese modo, poder generar por composición estructuras de espín  $0$  o  $1$ , como los mesones conocidos, y espín  $1/2$  o  $3/2$ , como los bariones. Precisamente, las reglas de composición de espines dictan que un sistema compuesto por dos espines iguales a  $1/2$  (mesones) puede tener un espín total igual a la diferencia,  $1/2 - 1/2 = 0$ , o a la suma  $1/2 + 1/2 = 1$ . En el caso de tres espines iguales a  $1/2$  (bariones), la composición de dos de ellos nos dejaría con espines  $0$  o  $1$  que, a su vez compuestos con el tercero, proporcionarían un espín total igual a  $1/2$  (que resultaría de  $0 + 1/2$  y de  $1 - 1/2$ ) o  $3/2$  (de  $1 + 1/2$ ). Debían contar además con número bariónico, para constituir bariones, y alguna carga eléctrica, por la naturaleza cargada de muchos hadrones. Consideremos, por tanto, dos unidades elementales que llamaremos  $u$  y  $d$ , y sus respectivas antipartículas,  $\bar{u}$  y  $\bar{d}$ , con carga y números cuánticos opuestos. Centrémonos ahora en adivinar la posible estructura de los mesones. Dado que su número bariónico debe ser  $0$ , las cuatro combinaciones posibles más sencillas son:  $u\bar{d}$ ,  $\bar{u}d$ ,  $u\bar{u}$  y  $d\bar{d}$ . Es decir, los mesones resultarían ser alguna suerte de molécula formada por una de estas entidades y una de sus antipartículas. Si asignamos la combinación  $u\bar{d}$  al pión  $\pi^+$ ,  $\bar{u}d$  encajará como el pión  $\pi^-$ , antipartícula del anterior. Y el pión neutro,  $\pi^0$ , y la también neutra partícula  $\eta$  pueden obtenerse a partir de las combinaciones neutras  $u\bar{u}$  y  $d\bar{d}$ . Si la naturaleza es simétrica bajo el intercambio de estas dos entidades, la masa de las cuatro partículas será la misma, y así ocurre de modo aproximado. Los cuatro mesones que hemos caracterizado poseen espín  $0$ , como resultado de que los espines de cada una de las dos entidades que la forman apuntan en direcciones opuestas y se cancelan. Las mismas combinaciones pueden darse con los dos espines apuntando en la misma dirección, en cuyo caso obtendríamos otros cuatro mesones con espín  $1$ . Efectivamente, esos cuatro mesones existen:  $\rho^+$ ,  $\rho^0$ ,  $\rho^-$  y  $\omega$  (omega), con masas que varían entre  $775$  y  $783$  MeV. El hecho de que estos cuatro mesones sean

## LA ESTABILIDAD DEL PROTÓN

Los dos bariones más ligeros, el protón y el neutrón, poseen masas casi idénticas debido a la simetría  $SU(2)$  de sabor. Como puede verse en la figura, el contenido en quarks del protón es  $uud$  y el del neutrón es  $udd$ . Desde el punto de vista de la interacción fuerte, sustituir el quark  $u$  por un quark  $d$  no tiene ningún efecto que pueda alterar la masa del sistema. Existe una ligera violación explícita de la simetría  $SU(2)$  asociada a la diferencia de masas del quark  $u$  y  $d$ , aproximadamente  $2$  MeV para el primero y  $5$  para el segundo. En términos de carga eléctrica, dadas las cargas  $2/3$  de  $u$  y  $-1/3$  de  $d$ , en unidades de la carga elemental, el neutrón es un sistema neutro ( $2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$ ) y el protón posee una carga neta positiva igual a  $1$  ( $2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$ ). La consecuencia de ello es que la distribución de carga para el protón es más inestable que la del neutrón (las cargas del mismo signo se repelen eléctricamente) y, en consecuencia, la contribución electromagnética a la masa del protón será mayor que para el neutrón. Ambos efectos producirían un protón más masivo que el neutrón. Sin embargo, la fuerza débil los compensa.

## Un afortunado y delicado balance

El equilibrio entre las intensidades de la fuerza débil y electromagnética es tal que el neutrón es solo levemente más masivo que el protón,  $939.6$  frente a  $938.3$  MeV. Pero esa pequeña diferencia es crucial. El protón es una partícula estable y el neutrón, ligeramente inestable, puede estabilizarse en el colectivo de nucleones que forman un núcleo. Con una fuerza débil algo menos intensa, el protón sería más masivo e inestable y el universo estaría únicamente compuesto por neutrones. Con una fuerza débil algo más intensa, la diferencia de masas entre protón y neutrón crecería y cuatro protones serían más estables que un núcleo de helio, en cuyo caso la reacción de fusión nuclear, que es la fuente de la energía de las estrellas, no podría producirse. El universo sería muy diferente de como es.





más masivos que los cuatro de espín 0 refuerza la idea de una estructura interna para los mesones, tal como la hemos descrito, al ser un sistema de dos espines opuestos más estable que uno con dos espines alineados. De hecho, dado un sistema con dos espines opuestos, sería necesario invertir una cierta cantidad de energía para «voltear» uno de ellos y pasar a un sistema con dos espines alineados. Dicha cantidad de energía explicaría el exceso de masa de los mesones de espín 1 respecto a los de espín 0.

Debemos notar que la carga eléctrica de  $u$  y  $\bar{d}$  (opuesta a la de  $d$ ) suman la unidad elemental de carga, es decir, la carga positiva del protón. Por tanto, estas entidades elementales deberían portar una fracción de la carga elemental. ¿Cuál? Veamos cómo obtener los bariones a partir de nuestras nuevas entidades elementales. Para fabricar combinaciones con espín  $1/2$  o  $3/2$ , como los bariones, necesitamos al menos tres de estas entidades, de modo que su número bariónico debería ser  $1/3$ . Las combinaciones más sencillas que podemos construir con ellas son:  $uuu$ ,  $uud$ ,  $udd$  y  $ddd$ . Con los tres espines alineados, el espín total será  $3/2$  y las cuatro combinaciones deben corresponderse con las cuatro partículas  $\Delta$ , cuyas masas serán iguales, una vez más, por la simetría de intercambio entre  $u$  y  $d$ . La combinación  $uuu$  debe corresponderse con la partícula  $\Delta^{++}$ , permitiéndonos asignar a  $u$  una carga igual a  $2/3$  de la unidad elemental, de suerte que la carga total sea:  $2/3 + 2/3 + 2/3 = 2$ . Análogamente, identificando  $ddd$  con la  $\Delta^{-}$ , necesitaremos para  $d$  una carga negativa igual a  $1/3$  de la unidad elemental, obteniéndose:  $-1/3 + (-1/3) + (-1/3) = -1$ . Así,  $udd$  producirá un mesón con carga neutra:  $2/3 + (-1/3) + (-1/3) = 0$ , que corresponderá a la  $\Delta^0$ . Y  $uud$ , a la  $\Delta^{+}$ , cuya carga resultaría de:  $2/3 + 2/3 + (-1/3) = 1$ . Estas asignaciones de carga también resultan ser compatibles con la estructura previamente sugerida para los piones, como puede comprobarse fácilmente. De hecho, todos los hadrones con  $S=0$  pueden describirse perfectamente con las combinaciones adecuadas de  $u$  y  $d$  y sus antipartículas.

¿Y los hadrones extraños? La simetría  $SU(3)$  que permite su organización en multipletes sugiere la necesidad de una tercera unidad elemental, que llamaremos  $s$ , y que podría intercambiarse con  $u$  y  $d$  sin cambiar el modo en el que la interacción fuerte

se manifiesta en la naturaleza. Las distintas combinaciones de  $u$ ,  $d$  y  $s$  permitirán describir la estructura elemental de todos los hadrones acomodados en los octetes y el decuplete que hemos introducido al dictado de las transformaciones de simetría (figuras 2 y 3). Sirvanos como ejemplo que los kaones cargados  $K^{-}$  y  $K^{+}$  resultarían de las combinaciones  $us$  y  $\bar{s}u$ , y el kaón neutro  $K^0$ , de  $\bar{s}d$ . La nueva unidad elemental  $s$  poseería una carga negativa igual a  $1/3$  de la unidad elemental, como  $d$ , y una extrañeza  $S=-1$ . En realidad, bajo este esquema de constituyentes subhadronicos, los hadrones extraños lo serían por incorporar a  $s$  en su estructura. La partícula  $\Omega^{-}$ , predicha y finalmente descubierta por los físicos experimentales de Brookhaven, estaría compuesta por  $sss$ , y de ahí su extrañeza  $S=-3$ . Dado que los hadrones extraños son más pesados que los no extraños, cabría imaginar que  $s$  es también más pesado que  $u$  y  $d$ . Así, aunque la interacción

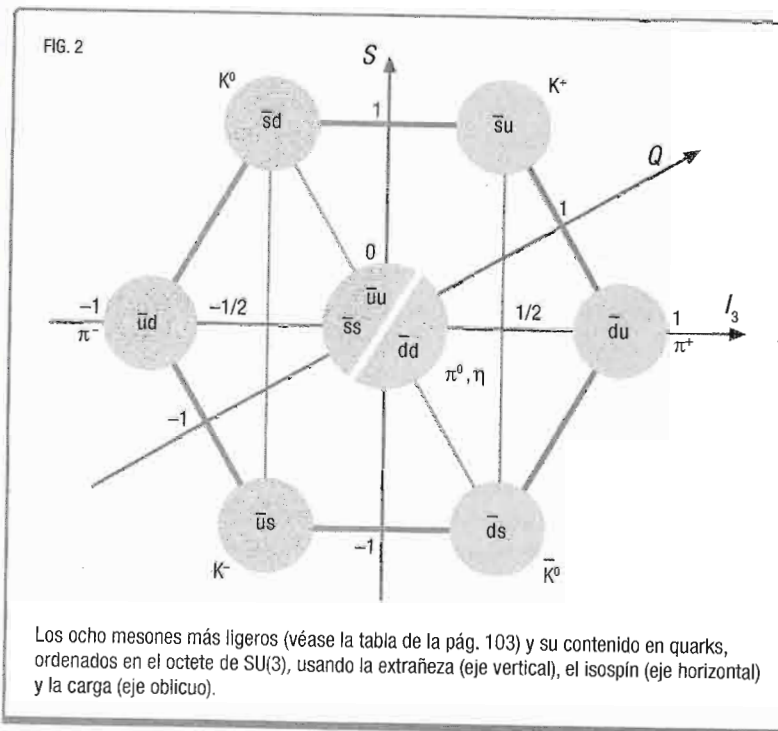
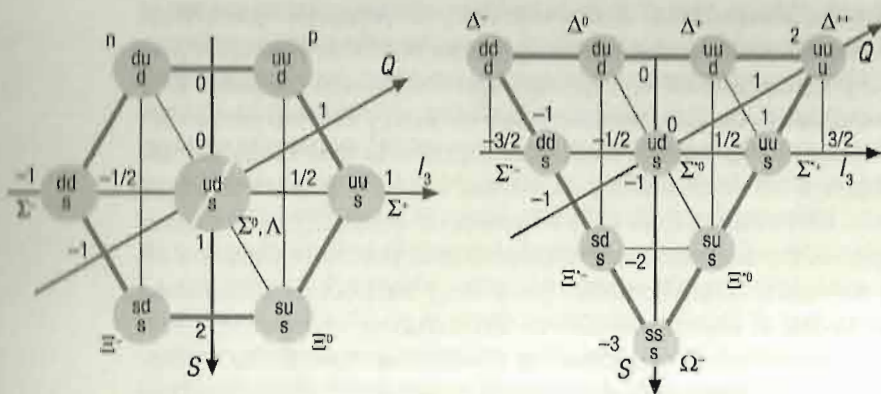


FIG. 3



Bariones más ligeros con espín 1/2 y espín 3/2 (véanse las tablas de la pág. 104) y su contenido en quarks, ordenados en el octete y decuplete de SU(3).

fuerte fuera exactamente invariante frente a las sustituciones de  $u$ ,  $d$  y  $s$ , la mayor masa de este último contribuiría a la dispersión de masas en los multipletes de SU(3).

Inspirándose en las ideas que acabamos de relatar brevemente, Murray Gell-Mann y George Zweig, de forma independiente, postularon en 1964 la existencia de los constituyentes subhadronicos cuyas propiedades acabamos de describir. Gell-Mann bautizó a estos componentes elementales de los hadrones con el nombre de *quarks*, y nombró sus tres diferentes tipos o especies como arriba, abajo y extraño (en inglés, *up*, *down* y *strange*). El nombre de *quark* fue inicialmente una pronunciación sin ortografía definida, con la que Gell-Mann se refería a sus «criaturas», hasta que él mismo tomó prestada dicha ortografía de una críptica cita de James Joyce en su libro *Finnegans Wake*: «Three quarks for Muster Mark» (*Tres quarks para Muster Mark*).

Del mismo modo que la ordenación de los elementos químicos en la tabla periódica de Mendeléyev, en la segunda mitad del siglo XIX, había sido el reflejo de la estructura interna del átomo que, posteriormente, Thomson y Rutherford comenzaron a des-

velar, la organización de la desconcertante fauna de hadrones, surgida en la década de 1950, por medio de los multipletes de las transformaciones de simetría de SU(3) era la reminiscencia de la estructura interna de los hadrones. El protón y el neutrón, entre ellos, resultaron no ser partículas elementales, sino compuestas de otras unidades más elementales: los quarks.



## Color, libertad y confinamiento

Los protones y los neutrones están constituidos por unidades elementales que fueron bautizadas como quarks. Son los quarks los que sienten la fuerza fuerte, portada por gluones, que mantiene los núcleos ligados y, aunque no pueden ser vistos, constituyen el sustrato elemental de la realidad visible.

La década de 1960 había revolucionado, una vez más, la comprensión de la estructura última de la materia desde el ámbito de la física moderna. Los componentes elementales de la materia eran, por un lado, los leptones, partículas muy ligeras que solo sentían la fuerza nuclear débil y, en el caso de portar carga, también la interacción electromagnética; por otro, los quarks, misteriosas unidades elementales que portaban fracciones de la carga del electrón y que eran los verdaderos responsables de la fuerza nuclear fuerte. Los hadrones eran partículas no elementales, constituidas por dos o tres quarks, denominadas mesones y bariones, respectivamente. En el caso de los mesones, se trataba de estructuras inestables que, en el mejor de los casos, vivían poco más de una cienmillonésima de segundo, aunque, según la teoría de Yukawa, parecían desempeñar un papel relevante en el modo en que el campo cuántico ligado a la fuerza nuclear fuerte llenaba el espacio, portando y propagando la interacción que permitía que unos bariones se ligaran a otros. Los bariones formaban una familia de fermiones cuyos dos componentes más ligeros eran el protón y el neutrón. Si bien solo el protón aislado es estable (hasta donde sabemos),



están tan próximos en masa que un colectivo de protones y neutrones puede formar un núcleo estable. El exceso de masa de un neutrón respecto a un protón se compensa, en los núcleos, por la contribución a la masa del núcleo que resulta de la repulsión eléctrica entre protones. La ilustración más sencilla de este fenómeno la proporciona el hidrógeno-2 o deuterio, isótopo estable compuesto por un protón y un neutrón, cuando la repulsión eléctrica impide que dos protones formen un sistema nuclear ligado. Núcleos y electrones constituyen, a su vez, los átomos que se repiten para construir la materia de la que está hecho el universo que vemos.

No obstante, si los protones y los neutrones, y todos los hadrones, estaban formados por quarks, ¿por qué aún no habían sido detectados? En las colisiones de hadrones a altas energías, estos se rompían y sus quarks constituyentes se reorganizaban. Por ejemplo, en la reacción de dispersión del mesón  $\pi^-$  (cuya estructura interna revela la presencia de una pareja de quarks  $d\bar{u}$ ) por protones (constituidos por un trío de quarks  $uud$ ), un resultado posible es la producción de  $\Sigma^-$  (con tres quarks  $dds$ ) y  $K^+$  (con una nueva pareja de quarks  $u\bar{s}$ ). Dicha reacción podría interpretarse como sigue: la colisión rompe el protón y el pion, liberando un quark  $u$  y dos quarks  $d$ ; un quark  $u$  y su antiquark  $\bar{u}$  se aniquilan entre sí, de tal modo que la energía liberada, incluyendo la originada por la velocidad de colisión de los hadrones, produce una pareja de quark y antiquark,  $s$  y  $\bar{s}$ ; y, finalmente, los quarks se reorganizan para constituir un barión  $\Sigma^-$  y un mesón  $K^+$ . La primera enseñanza que puede extraerse de este análisis cualitativo de la reacción es que el número de quarks de cada especie se conserva, antes y después de la reacción. Se conserva, al menos, cuando la fuerza nuclear fuerte gobierna la reacción (en los procesos gobernados por la fuerza débil, como veremos, algún quark cambia de especie). Sin embargo, podemos interrogarnos sobre un punto crucial: si la colisión parece liberar los quarks, ¿por qué todos se recombinan en nuevos hadrones? ¿Por qué ninguno resulta despedido como un fragmento de la colisión y es detectado como una partícula aislada? Para intentar responder a esta pregunta necesitamos

saber más sobre las fuerzas que mantienen los quarks ligados en un hadrón.

## EL SABOR DE LOS QUARKS

En la década de 1930, Yukawa había propuesto una teoría que describía de manera efectiva la fuerza nuclear fuerte entre nucleones, y Fermi había hecho lo propio con la fuerza nuclear débil al formular su teoría para la desintegración débil. En ambos casos, se trata de teorías efectivas que, a pesar de su éxito fenomenológico, no describen de manera fundamental la interacción. En el caso de la desintegración débil, el mecanismo propuesto por Fermi explicaba el proceso por el cual un neutrón decaía en un protón, emitiendo un electrón y un antineutrino, o por el cual un protón emitía un positrón y un neutrino, transformándose en un neutrón. De uno u otro modo, el núcleo aumentaría o disminuiría su número atómico en una unidad, como correspondía a la desintegración débil. En términos de quarks, el proceso consiste en:

$$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e,$$

donde un quark de la especie  $d$  se transforma en quark de la especie  $u$  y emite un electrón y un antineutrino; o en:

$$u \rightarrow d + e^+ + \nu_e,$$

donde el quark pasa de la especie  $u$  a la especie  $d$  y emite un positrón y un neutrino, conservándose en ambos casos la carga eléctrica y los números bariónico y leptónico. De ese modo, la estructura  $udd$  (neutrón) pasa a  $uud$  (protón), o viceversa. La desintegración del kaón cargado,  $K^-(u\bar{s})$ , en un antimuón y un

neutrino también era un proceso débil, cuya transformación subyacente era:

$$\bar{s} \rightarrow \bar{u} + \mu^+ + \nu_\mu$$

y la ulterior aniquilación del antiquark  $\bar{u}$  y el quark  $u$  del kaón. La fuerza nuclear débil, por tanto, implicaba un cambio en la especie de quark, violando explícitamente la simetría de isospín, o la extendida SU(3) propuesta por Gell-Mann y Ne'eman. Los físicos de partículas se pusieron de acuerdo en emplear el término *sabor* para referirse a cada una de las especies de quarks, y la simetría de intercambio de especies, usada para organizar los hadrones en multipletes e inspiradora del modelo de quarks, pasó a conocerse como *simetría de sabor*. En 1964, cuando Zweig y Gell-Man propusieron el modelo de quarks, el número de especies era tres, a saber, arriba ( $u$ ), abajo ( $d$ ) y extraño ( $s$ ). Sin embargo, tres sabores se revelaron insuficientes en un mundo en el que tenían cabida un electrón y un muon. Pronto entenderemos la razón.

En primer lugar, si nos fijamos en las reacciones anteriores, se ha usado una notación diferente para el neutrino que acompaña al muon en el cambio de sabor de  $\bar{s}$  y para el que es emitido con el electrón en el cambio de sabor de  $d$ . La razón es que no son la misma partícula. No hay un solo neutrino. Hay un neutrino del electrón y un neutrino del muon, y son cuatro, por tanto, los leptones: el electrón y su neutrino, y el muon y su neutrino.

En la segunda mitad de la década de 1960, Sheldon Glashow, Abdus Salam y Steven Weinberg extendieron las ideas que habían llevado a la formulación de la electrodinámica cuántica (QED) para desarrollar una teoría que unificaba las interacciones débiles y electromagnéticas. La formulación de la QED se había basado en la constatación de que las transformaciones gauge propias del electromagnetismo podían escribirse bajo la forma de transformaciones de simetría para los campos, cuya



Arriba, fotografía aérea del CERN en la que se observa el perímetro del acelerador LHC y los detectores ALICE, ATLAS, CMS y LHCb. Abajo, Steven Weinberg (izquierda) y Sheldon Glashow (derecha) se felicitan por el premio Nobel de Física de 1979.



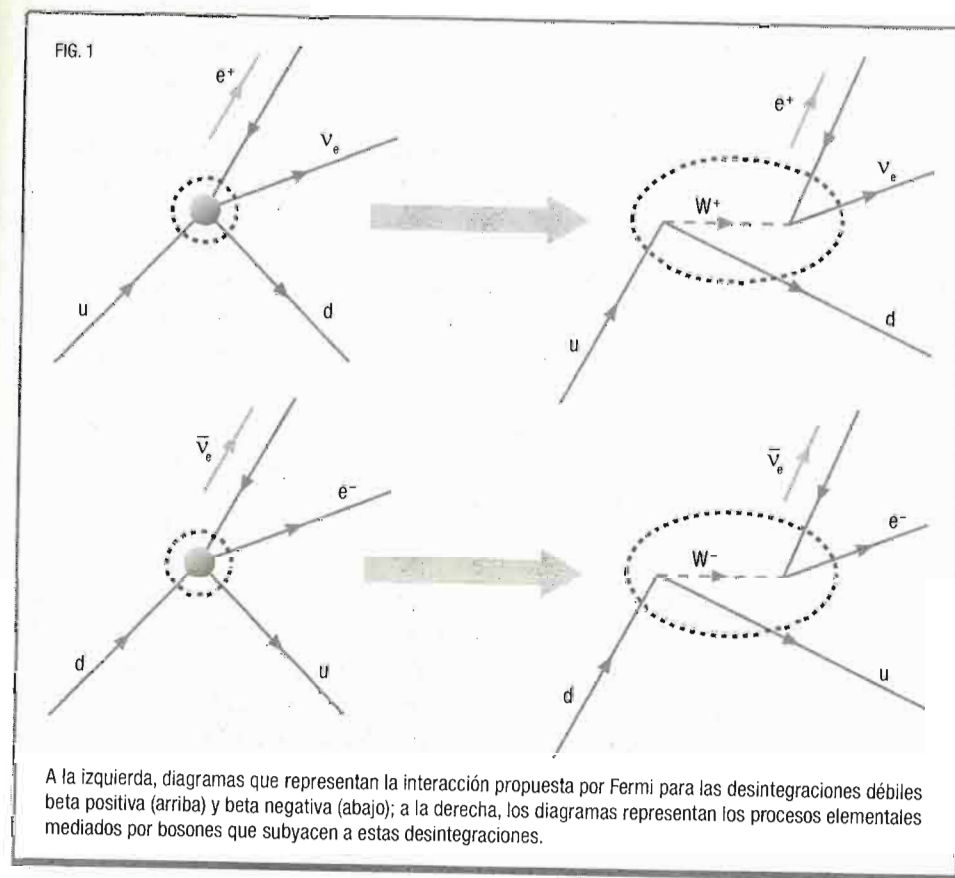
estructura se correspondía con un grupo de Lie, representado como  $U(1)$ . Bajo esa formulación, emergía una teoría cuántica de campos renormalizable (donde los infinitos se trataban apropiadamente) que reproducía los experimentos con una inusitada precisión. Glashow, Salam y Weinberg descubrieron que podían generalizar el esquema, imponiendo transformaciones de simetría que poseían la estructura de un grupo de Lie más grande, el mismo  $SU(2)$  del que hablamos en el capítulo anterior, incorporando los fenómenos asociados a la fuerza nuclear débil. La formulación matemática es muy técnica y compleja, pero el resultado final es una fuerza débil que puede describirse a partir de la interacción de un quark con un leptón, por medio del intercambio de tres nuevos bosones portadores de la interacción:  $W^+$ ,  $W^-$  y  $Z^0$ . Los dos primeros, cargados eléctricamente, y el tercero, neutro, como indican los superíndices.

Al hombre le fascina la simetría.  
Nos gusta ver simetrías en la naturaleza.

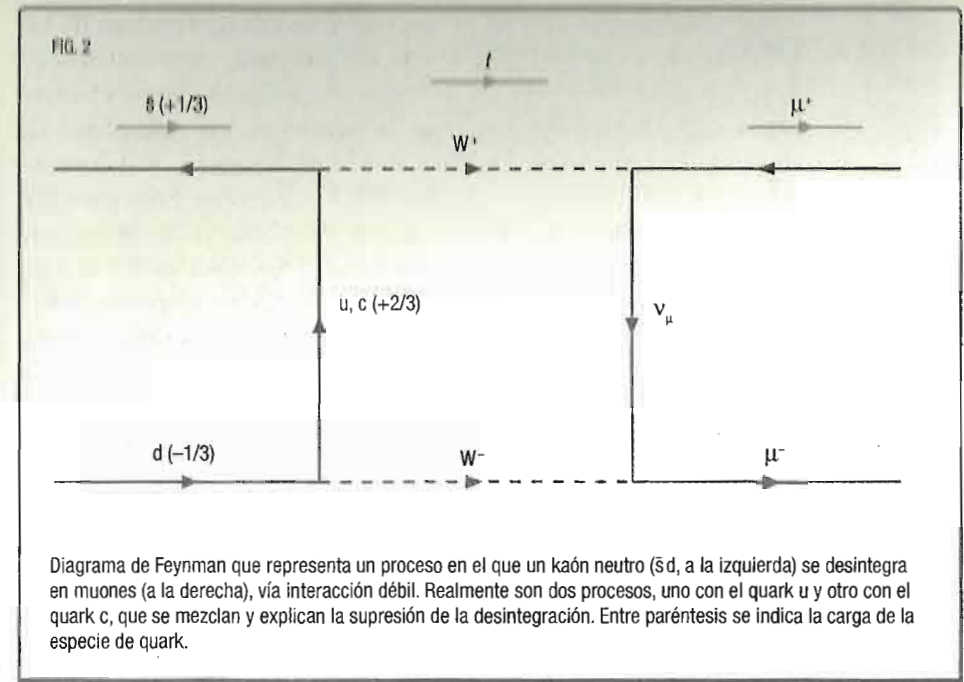
RICHARD P. FEYNMAN

Veamos un ejemplo. Consideremos un quark de la especie  $u$  y un electrón. El primero emite un bosón  $W^+$  que es absorbido por el segundo, siguiendo el mismo mecanismo cuántico que hemos detallado en el caso de la interacción electromagnética entre partículas cargadas, vía intercambio de fotones. ¿Cuál es el resultado de la emisión y absorción del bosón  $W^+$ ? El quark  $u$ , con carga eléctrica  $+2/3$ , en unidades de la carga elemental, pierde la carga  $+1$  del bosón emitido y se transforma en un quark de la especie  $d$ , con carga  $-1/3$ . Por su parte, el electrón absorbe la carga  $+1$  del bosón y se transforma en el leptón neutro de su misma especie: el neutrino del electrón. En resumen, un quark  $u$  y un electrón «se sienten» por medio del campo cuántico de la fuerza débil, portado por un bosón  $W^+$ , interaccionan y se transforman, respectivamente, en un quark  $d$  y un neutrino del electrón. También es posible considerar que el quark  $u$  se transforma en el quark  $d$ , emitiendo un bosón  $W^+$  que produce, a su vez, un positrón y un neutrino. El positrón se lleva la carga del bosón y el neutrino conserva el número leptónico. Tal es el proceso elemental, en la teoría de Glashow,

Salam y Weinberg, que explica la conversión de un protón en un neutrón de un núcleo en una desintegración beta positiva (figura 1). Este tipo de procesos, en los que el bosón mediador de la interacción porta carga, se llaman *de corriente cargada*. El bosón  $Z^0$ , en cambio, posibilita la interacción de leptones neutros con quarks, sin que cambien ni el sabor ni la carga. Los procesos mediados por el  $Z^0$  se llaman *de corriente neutra* y constituyen una predicción genuina de la teoría. Finalmente fueron descubiertos en 1973 por la colaboración Gargamelle en el CERN (siglas en francés de la Organización Europea para la Investigación Nuclear) de Ginebra.



La simetría que está en la base de la teoría unificadora de las interacciones débiles y el electromagnetismo, denominada *de isospín débil*, conduce a que las verdaderas unidades elementales, los quarks y los leptones, se organicen en multipletes de dos elementos, llamados dobletes. Los quarks  $u$  y  $d$  forman un doblete y el electrón y su neutrino forman otro. Solo esos dos dobletes contienen todos los ingredientes básicos de la materia estable que conocemos en nuestro universo. Quarks  $u$  y  $d$  para formar protones y neutrones que, a su vez, forman núcleos; electrones que rodean los núcleos, y neutrinos que resultan de las desintegraciones débiles que estabilizan los núcleos. Existía, sin embargo, un segundo doblete de leptones formado por el muon y su neutrino. Este segundo doblete constituye alguna suerte de réplica del primero, pero con masas mayores. Y existía también, en la década de 1960, un sabor adicional de quark,  $s$ , que parecía desubicado. Más pesado que los quarks  $u$  y  $d$ , podría constituir uno de los componentes de un segundo doblete de quarks que completara la réplica de los que formaban la materia estable. Así lo pensaban los físicos a finales de los años sesenta, si bien fueron finalmente Sheldon Glashow, John Iliopoulos y Luciano Maiani los que, en 1970, justificaron la existencia de un cuarto sabor como la causa por la que los kaones neutros no se desintegraban en muones y antimuones, por mediación de dos bosones,  $W^+$  y  $W^-$ . La figura 2 ilustra la naturaleza del proceso que posibilitaría este tipo de desintegraciones. Dicho proceso puede interpretarse como la transformación simultánea de los dos quarks del  $K^0$  ( $\bar{s}d$ ), el  $\bar{s}$  en un  $\bar{u}$  emitiendo un  $W^+$  y el  $d$  en un  $u$  emitiendo un  $W^-$ ; los quarks  $u$  y  $\bar{u}$  se aniquilarían entre sí y los bosones  $W^+$  y  $W^-$  generarían una pareja de antimuon y neutrino, el primero, y una pareja de muon y antineutrino, el segundo. En este último paso, los neutrinos tendrán carácter virtual y deben también aniquilarse entre sí, emergiendo únicamente una pareja detectable de muones. Nada prohíbe, en principio, este proceso, si bien ya había quedado experimentalmente excluido en la década de los sesenta. En realidad, como sugirieron Glashow, Iliopoulos y Maiani, el proceso está suprimido por la existencia de un cuarto sabor de quark, que se combinaría con el sabor  $u$  en la transfor-



mación de los quarks  $\bar{s}$  y  $d$ , vía interacción débil. Los detalles del porqué de esta supresión son muy técnicos y complejos pero, en esencia, se produciría si el cuarto sabor de quark fuera mucho más pesado que el  $u$ .

Este cuarto sabor de quark recibió el nombre de *encanto*, y el *quark encantado*, representado por  $c$ , debía ligarse y formar mesones y bariones con los otros sabores y con otros quarks encantados. En 1974, los laboratorios de Brookhaven en Nueva York y el Laboratorio de Aceleradores SLAC en California, anunciaron el descubrimiento de una nueva partícula, un mesón cuya estructura resultó ser  $c\bar{c}$  y que los primeros nombraron  $J$  y los segundos  $\Psi$  (psi). Hoy, se conoce como  $J/\Psi$ , la primera partícula con encanto detectada por el ser humano.

Los físicos llamaron *generación* a cada pareja formada por un doblete de quarks y uno de leptones. La primera generación, constituyente de la materia estable, formada por los quarks  $u$  y  $d$ ,



## EL BOSÓN DE HIGGS

La teoría de Glashow, Salam y Weinberg unifica el electromagnetismo y la interacción débil, y fruto de esa unificación, los tres bosones débiles y el fotón tienen un origen común. Sin entrar en detalles, la simetría impuesta predice cuatro bosones sin masa, con espín 1 o escalares (espín 0).

### Ruptura espontánea de simetría

El conocido mecanismo de Brout-Englert-Higgs rompe espontáneamente la simetría original y explica las masas de los bosones portadores de la fuerza nuclear débil. Según este mecanismo, los cuatro bosones que originalmente emergerían de la teoría unificada se acoplan al campo de Higgs, un campo bosónico escalar o de espín 0. El resultado es que los dos bosones cargados,  $W^+$  y  $W^-$ , inicialmente de masa nula, adquieren una masa tal que solo pueden ser mediadores de una interacción de muy corto alcance. Los dos bosones neutros originales dan lugar a dos combinaciones distintas. Una de ellas es el fotón, que no se acopla al campo de Higgs y permanece sin masa, mediando, por tanto, en una interacción de largo alcance; la otra combinación corresponde al bosón  $Z^0$ , que adquiere masa y origina los procesos de corriente neutra. La excitación cuántica elemental del campo de Higgs se detecta como una partícula, conocida como bosón de Higgs. El 14 de marzo de 2013, el CERN confirmaba que la partícula anunciada un año antes y producida por el acelerador LHC (Large Hadron Collider) era consistente con el bosón de Higgs.



Peter Higgs, uno de los teóricos que predijo la existencia del bosón que lleva su nombre, posa junto a uno de los detectores del LHC, donde se acabó descubriendo la citada partícula.

el electrón y su neutrino; la segunda generación, por los quarks  $c$  y  $s$ , el muon y su neutrino. Hoy sabemos que hay una tercera formada por los quarks cima (*top*) y fondo (*bottom*), y un leptón nombrado leptón  $\tau$  (tau) y su neutrino. El leptón  $\tau$  es una réplica idéntica al muon o al electrón, aunque mucho más masiva que estos. Otro tanto ocurre, por ejemplo con el quark cima y los quarks  $c$  y  $u$ . Los físicos no están de acuerdo en el porqué de estas réplicas o de su número pero, hasta donde se sabe, la naturaleza ha producido tres generaciones de quarks y leptones.

## EL COLOR DE LOS QUARKS

La interacción propuesta por Yukawa pretendía explicar cómo los nucleones permanecían ligados entre sí en el núcleo. La vía óctuple y el modelo de quarks puso de manifiesto, en la década de 1960, que la pregunta elemental no era cómo se ligan los nucleones, sino cómo lo hacen los quarks en el hadrón. Las fuerzas entre nucleones no eran sino el resultado efectivo de la acción colectiva de una interacción más fundamental entre los constituyentes elementales de los hadrones, del mismo modo que las fuerzas intermoleculares se derivan de las fuerzas de naturaleza eléctrica que mantienen unido el átomo. La interacción fuerte, en realidad, actuaba entre quarks. Pero ¿qué era y cómo actuaba esta interacción?

Centremos nuestra atención primero en la partícula  $\Delta^{++}$ . Como ya dijimos, se trata de un barión de espín  $3/2$  con una estructura  $uuu$ , en la que el espín de todos los quarks apunta en la misma dirección. Una combinación de tres quarks con los mismos números cuánticos que quedará igual si se permutan dos cualesquiera de ellos. Es decir, una combinación simétrica excluida para fermiones por el principio de exclusión de Pauli. Los quarks son fermiones, ¿significa la existencia misma de la  $\Delta^{++}$  que no se comportan como deben? El problema ya fue planteado en 1964 por Oscar Greenberg, quien propuso una posible solución que implicaba la existencia de algún número cuántico oculto. Muy poco después, Moo-Young Han y



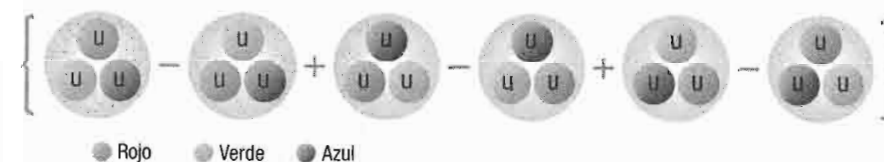
Yoichiro Nambu sugirieron que la conservación de ese número cuántico estaba asociada a una nueva simetría que organizaba a los quarks en tripletes, respecto a las nuevas transformaciones, permitiendo construir funciones de onda antisimétricas, como el principio de Pauli decretaba. Finalmente, fueron Harald Fritzsch y Murray Gell-Mann, en 1970, los que dieron su forma definitiva al concepto actual de una simetría adicional basada en un nuevo número cuántico. Fritzsch y Gell-Mann llamaron *color* a este nuevo número cuántico y, siguiendo la sugerencia previa de Nambu y Han, propusieron que el color era la fuente del campo cuántico de la fuerza fuerte. El color era, por tanto, una carga como la eléctrica o la de isospín débil y, según el esquema de Fritzsch y Gell-Mann, era independiente de ellas. Los diferentes campos no interferían los unos con los otros.

Las transformaciones de esta nueva simetría de color tenían también la estructura de un grupo de Lie, como las asociadas al campo que unificaba electromagnetismo y fuerza débil (también llamado electrodébil). Dado que la primera teoría cuántica de las interacciones basada en transformaciones de simetría, la QED, había sido sugerida por las transformaciones gauge del electromagnetismo, se dio el nombre genérico de *transformaciones gauge* a aquellas que estaban en el origen de las interacciones fundamentales. Y se llamó *teorías gauge* a las basadas en estas transformaciones de simetría. En el caso de la teoría del color para la interacción fuerte, el grupo de Lie de las transformaciones era SU(3), el mismo que había servido para la vía óctuple y el modelo de quarks. Sin embargo, en aquel caso, la simetría de sabor era una simetría aproximada, por cuanto mezclaba sabores de quarks pertenecientes a dobletes de diferentes generaciones, u, d y s, a escalas de energía y masa muy diferentes. En el caso del color, la simetría se basaba en la existencia y conservación de tres tipos o especies de carga que, por convención, se denominaron rojo, azul y verde. Esta simetría era exacta en la naturaleza y originaba una fuerza fundamental, como la conservación de la carga eléctrica estaba en el origen del electromagnetismo. Cada uno de los quarks debía poseer

una carga determinada de color. Eran entidades «coloreadas». De ese modo, era posible construir una configuración antisimétrica de tres quarks u con espines alineados (figura 3) que correspondería a la partícula  $\Delta^{++}$ .

La teoría cuántica de campos para la interacción fuerte basada en las transformaciones SU(3) de color se conoce como *cromodinámica cuántica* (QCD, por sus siglas en inglés). Igual que sucedía con la teoría de Glashow, Salam y Weinberg, sus detalles son muy técnicos y complejos. Como entonces, nos contentaremos con indicar que el resultado es una interacción mediada por nuevos bosones, ocho en este caso, que se ordenan en un octete. Estos nuevos bosones fueron bautizados como *gluones* (del inglés *glue*, «pegamento»). Los gluones se acoplan a los quarks, es decir, pueden ser emitidos o absorbidos por estos, y dicho acoplamiento es mucho más complicado que el de los fotones con las partículas con carga eléctrica. La emisión de un fotón no comportaba ningún cambio en la naturaleza de la carga de la partícula. Un electrón seguía siendo un electrón, con su misma carga elemental negativa, cuando emitía el fotón virtual que portaría la cantidad de movimiento intercambiada con un segundo electrón. Este segundo electrón tampoco veía alterada su carga, o ninguna otra de sus propiedades esenciales, cuando absorbía el fotón virtual. Los bosones  $W^{+/-}$ , en cambio, aumentaban o disminuían la carga

FIG. 3



Representación esquemática de la función de onda del barión  $\Delta^{++}$ , formado por tres quarks u. La alternancia de signos garantiza que, si se intercambian dos quarks en todos los sumandos, la función de onda es igual a ella misma cambiada de signo, como corresponde a la función de onda antisimétrica para un fermión. Si suprimimos el color, la función de onda es nula, al ser idénticos todos los términos y cancelarse estos por los signos.

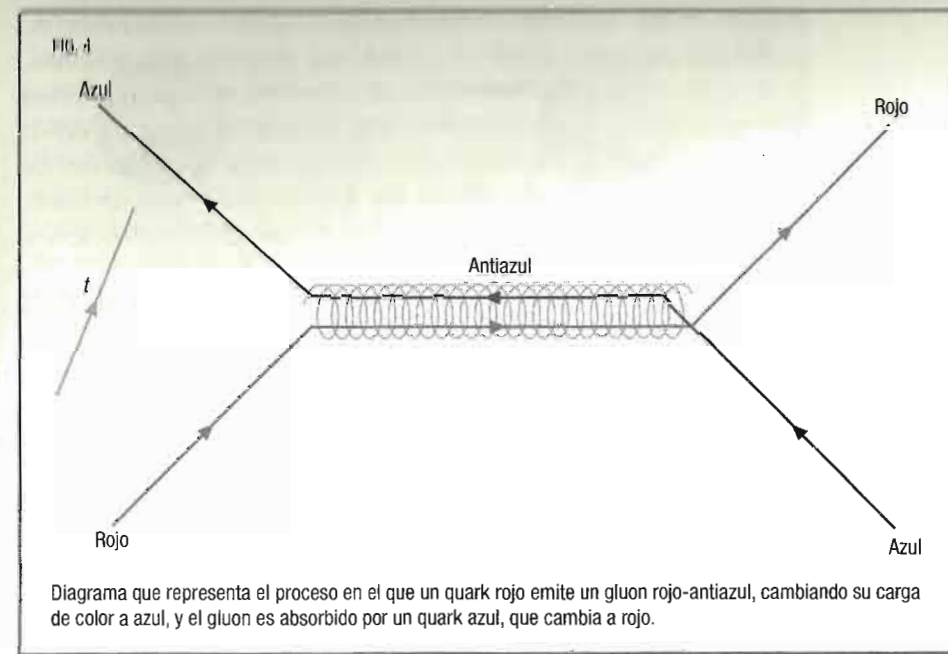


eléctrica en una unidad elemental, generando los procesos de corriente cargada de los que ya hemos hablado. Los gluones, por su parte, no interfieren con la carga eléctrica pero pueden modificar la de color. Pueden transportar la carga de color de unos quarks a otros, cambiándoles el color. Los gluones, de hecho, son los generadores de las transformaciones de simetría, que consisten en cambios de color en los estados sobre los que operan.

Consideremos, por ejemplo, un quark rojo y otro azul. El quark rojo puede emitir un gluon que «se lleva» el color rojo y que «trae» el color azul, pasando a ser un quark azul. Ese gluon se propagará hasta el quark azul que, al absorberlo, dejará de ser azul y adquirirá el color rojo (figura 4). Se dice que el gluon porta una carga rojo-antiazul. Un *anticolor* suprime un color dado y la emisión de un anticolor consiste en la anulación de dicha supresión, es decir, en la adquisición de dicho color. Así pues, hay nueve posibles conversiones de color que podemos expresar como sigue:

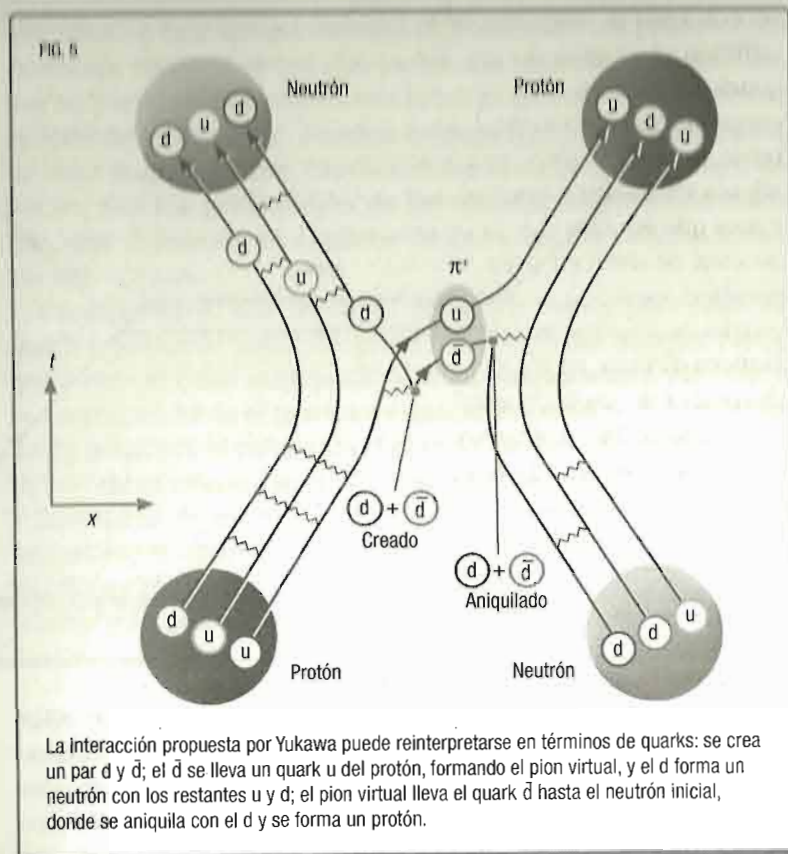
rojo-antiazul: azul  $\rightarrow$  rojo  
 rojo-antiverde: verde  $\rightarrow$  rojo  
 azul-antirrojo: rojo  $\rightarrow$  azul  
 azul-antiverde: verde  $\rightarrow$  azul  
 verde-antirrojo: rojo  $\rightarrow$  verde  
 verde-antiazul: azul  $\rightarrow$  verde  
 rojo-antirrojo: rojo  $\rightarrow$  rojo  
 azul-antiazul: azul  $\rightarrow$  azul  
 verde-antiverde: verde  $\rightarrow$  verde

Sin embargo, las tres últimas conversiones neutras pueden sumarse para dar un estado rojo-antirrojo + azul-antiazul + verde-antiverde. Esta combinación no se vería modificada por una permutación de colores, constituyendo el tipo de estado invariante bajo transformaciones de simetría que, en el capítulo anterior, denominamos singlete. El estado singlete es, pues, una combinación de las tres últimas conversiones de color que, de hecho, puede eliminarse suprimiendo una de ellas. Así, las ocho



conversiones restantes, y cualquier combinación que de ellas pueda resultar, formarán estados no invariantes bajo permutaciones de color. Estos ocho estados conforman un octete y se corresponden con los ocho gluones de la teoría. Los ocho bosones que portarán la interacción fuerte entre quarks y que los mantendrán ligados formando hadrones.

¿Por qué hadrones formados por dos quarks (mesones) o tres (bariones)? En el marco de la QCD, la respuesta es sencilla. Son las combinaciones más simples que permiten «configuraciones blancas» o no coloreadas, invariantes bajo permutaciones de color. Tres quarks, cada uno de ellos con un color distinto, forman un estado de color blanco. Dos quarks (un quark y un antiquark) en el estado singlete formado por las tres combinaciones neutras de color y anticolor, que hemos destacado antes, también constituyen un estado no coloreado. Esta última configuración es la de los mesones. La primera corresponde a los bariones. En resumen, los hadrones son simplemente estados singlete, desde



el punto de vista de la simetría  $SU(3)$  de color que está en la base de la teoría de la interacción fuerte. En la figura 5 se muestra la interacción de Yukawa interpretada en términos de quarks, que se agrupan en mesones y bariones sin color.

## LIBERTAD EN LAS DISTANCIAS CORTAS

La QCD respondía a la pregunta de por qué los hadrones se presentaban como estados ligados de dos y tres quarks postulando que los estados físicos observables en la naturaleza debían ser

no coloreados, singletes de la simetría de color. Así se resolvía también el enigma de por qué no se había detectado nunca un quark aislado, ni tampoco se había medido una fracción de la carga eléctrica elemental que pudiera corresponder a algo diferente de los estados hadrónicos conocidos. Pero debía existir alguna causa fundamental que justificara dicho postulado, una causa que emanara de la propia teoría y de las propiedades que de esta se derivan para la interacción. Antes de abordar esta cuestión esencial, existe otro interrogante más urgente: si los quarks no se presentan aislados, ¿es posible entonces probar, de manera directa, su existencia como unidades elementales constituyentes de los hadrones?

La respuesta es afirmativa. Aunque confinados en el interior de un hadrón, los quarks se pueden «ver». Precisamente con el propósito de «mirar» en el interior de un protón y escudriñar su estructura interna, se diseñó el acelerador lineal que da nombre al SLAC de Stanford (California), el mismo en el que se observó la partícula  $J/\Psi$  en 1974. La idea era, de algún modo, repetir el experimento de Geiger-Marsden que, a principios del siglo pasado, llevó a Rutherford a proponer la existencia del núcleo atómico. En dicho experimento, con el objeto de indagar en la estructura del átomo, se había hecho incidir un haz de partículas alfa sobre un blanco formado por átomos de oro. Para explorar el interior del protón, en cambio, era más apropiado usar electrones como proyectiles. Los electrones son, hasta donde se sabe, partículas elementales y no sienten la interacción fuerte. Por tanto, suficientemente acelerados, penetrarían en las entrañas del protón y serían dispersados según su configuración interna de carga eléctrica. Así, la distribución de electrones dispersados reflejaría la distribución de cargas en el interior del protón.

En mecánica cuántica, la resolución espacial de un experimento de dispersión, es decir, la mínima distancia que puede discernirse con precisión, viene dada por la longitud de onda asociada al haz de partículas incidentes, que resulta ser la constante de Planck dividida por la cantidad de movimiento de estas. En realidad, un experimento de dispersión no es muy distinto



Neutrino

Fotón

Electrón

#### QUARKS, LA UNIDAD FUNDAMENTAL DE LA MATERIA

Como se observa en la figura, los bariones como el protón y el neutrón están, a su vez, constituidos por tres quarks, formando una combinación neutra de una propiedad cuántica llamada color. La desintegración de un protón es el resultado de un cambio en otra de las propiedades de uno de los quarks: el sabor. El cambio de sabor conlleva un cambio de carga y la emisión de un leptón cargado (electrón o positrón) y otro neutro (neutrino o antineutrino).

#### EL HELIO, UNA COMBINACIÓN DE PROTONES Y NEUTRONES

La materia bariónica de nuestro universo, es decir, la materia que forma todo lo que nos rodea, se organizó en núcleos cuando las reacciones nucleares permitieron la fusión de protones que condujeron a la especialmente estable configuración de cuatro nucleones del helio: dos protones y dos neutrones, como se ve en la figura. Para la formación del helio es necesaria la desintegración por fuerza nuclear débil de un protón, que emite un neutrino, y un positrón, dejando atrás un neutrón.

#### COLISIONES ENTRE NÚCLEOS

La colisión entre núcleos de diferentes elementos es un mecanismo a través del cual se pueden producir nuevos núcleos de otros elementos, fotones y leptones.

Electrón

#### LA IMPORTANCIA DE LA RADIACIÓN

Los leptones cargados, como el electrón, interaccionan con la radiación (fotones) como se observa en la figura. En consecuencia, la radiación puede ionizar átomos, arrancando sus electrones. Los quarks también interactúan electromagnéticamente por medio de la radiación pero, sobre todo, se ligan unos a otros para formar nucleones por medio de la fuerza fuerte, que tiene su origen en el color portado por los quarks. Esta fuerza nuclear que gobierna las reacciones y la estructura de los núcleos es una interacción residual, resultante de la fuerza de color entre quarks.

de la sencilla experiencia cotidiana de ver. En esta última, los fotones proyectados por una lámpara, por ejemplo, son reflejados por la superficie de la hoja del libro, diferenciándose las regiones donde hay tinta de aquellas donde no hay; después, son recogidos por nuestro ojo y la información que proporcionan es procesada por nuestro cerebro, que, en última instancia, lee. Si queremos «ver» en el interior de un protón, necesitamos longitudes de onda más pequeñas que su tamaño medio (recuérdese lo que dijimos sobre el concepto de tamaño en mecánica cuántica, a propósito del átomo), más pequeñas cuanto mayor sea la definición con la que queramos ver. Se requieren, por tanto, longitudes de onda del orden de décimas o centésimas de fermi. Por eso, es más apropiado usar electrones acelerados a gran velocidad en lugar de fotones. Cambiaremos la lámpara por un acelerador de partículas como el del SLAC, nuestro ojo por sofisticados detectores que percibirán los electrones dispersados, y un sistema electrónico e informático de procesamiento y tratamiento de señales desempeñará el papel de nuestro sistema nervioso y nuestro cerebro. Así, con electrones acelerados en el SLAC a energías de 20 000 MeV fue posible asomarse al interior del protón y, a principios de la década de 1960, discernir cómo se distribuía la carga eléctrica en su interior.

Los resultados del SLAC fueron bastante concluyentes. Los electrones eran frecuentemente dispersados hacia atrás, con ángulos muy grandes respecto a la dirección del haz incidente. Como en el experimento de Geiger-Marsden, ello indicaba que la carga estaba concentrada en regiones muy reducidas, y no distribuida uniformemente en el interior del protón, como dictaba el modelo de quarks. Fruto, además, de cuidadosas medidas y minuciosas comparaciones usando diferentes blancos, pudo establecerse la carga eléctrica acumulada en dichas regiones. El resultado fue un rotundo éxito para las predicciones del modelo de quarks: las cargas eran  $2/3$  y  $-1/3$ , en unidades de la carga elemental. También fue posible determinar qué fracción de la cantidad de movimiento total del protón era portada por cada uno de los quarks. Sumadas las contribuciones de cada uno, los quarks llevaban aproximadamente el 50% de la

cantidad total. El 50% restante correspondía a otros «constituyentes» de los que ya hemos hablado y que, por no tener carga eléctrica, permanecían invisibles a los electrones: los gluones.

Para escrutar el interior de un hadrón también era posible usar otro tipo de proyectil: el neutrino. Los quarks interactuaban a través de la fuerza débil con los neutrinos, dispersándolos también, como a los electrones. Además, en los procesos de corriente cargada, el resultado de la interacción era un electrón o un muon que podía detectarse con relativa facilidad. Los neutrinos solo interactuaban débilmente, no sentían ni la fuerza eléctrica ni la fuerte y solo muy raramente sufrían dispersión por nucleones. Si era posible detectar esas dispersiones de neutrinos por un nucleón y estudiarlas cuidadosamente, la información obtenida sería muy valiosa. Tal fue el propósito de la construcción de Gargamelle en el CERN, una gran cámara diseñada para la detección del rastro dejado por la dispersión de un neutrino por un núcleo. Este detector dio nombre a la colaboración que descubrió experimentalmente los procesos de corriente neutra.

La información combinada obtenida de los experimentos de dispersión de neutrinos y electrones por nucleones dejó una imagen muy clara y precisa del interior de estos últimos. Estaban compuestos por quarks, como Gell-Mann y Zweig habían propuesto. Pero estos quarks se comportaban como partículas que, sorprendentemente, no formaban parte de ninguna estructura. Cuando un electrón o un neutrino y un quark interactuaban, en el interior de un nucleón, con un intercambio suficientemente alto de momento, el quark parecía no sentir la fuerza ejercida por los otros quarks. La dispersión resultaba puramente elástica, lo que quiere decir que toda la energía se invertía en cambiar el momento del quark afectado, permaneciendo los otros quarks como meros espectadores. Los quarks se comportaban como partículas libres, aislados los unos de los otros, dentro del dominio espacial del nucleón. Este fenómeno se conoce como *libertad asintótica*.

Si una teoría es bella, al final resulta útil.

MURRAY GELL-MANN



## LA CÁMARA DE BURBUJAS GARGAMELLE

El carácter elusivo de los neutrinos, leptones eléctricamente neutros que solo sienten la fuerza débil, condujo al diseño de Gargamelle, que operó con éxito en el CERN entre 1970 y 1979. Gargamelle era una cámara de burbujas de dimensiones gigantescas para la época. De ahí que su nombre aludiera a una gigante, la madre de Gargantúa en la novela de François Rabelais *Gargantúa y Pantagruel*.

### Estelas de partículas

Una cámara de burbujas es, en esencia, un tanque lleno de un líquido (normalmente hidrógeno o freón líquido) sometido a una cierta presión y cerca de su punto de ebullición. Periódicamente, se reduce la presión del tanque y, como resultado, al bajar el punto de ebullición con la presión, empiezan a formarse burbujas microscópicas de gas en el seno del líquido. Estas burbujas se forman preferentemente en las regiones donde el paso de una partícula cargada ioniza el medio, dejando una traza similar a la estela de un reactor en el cielo, que puede fotografiarse mostrando la trayectoria de la partícula. Electroimanes dispuestos alrededor del tanque generan un campo magnético que desviará la trayectoria en función de la relación entre la carga y la masa de la partícula, permitiendo su identificación. La cámara de burbujas fue inventada por Donald Glaser, que recibió por ello el premio Nobel de Física en 1960.



Cámara de burbujas Gargamelle expuesta en el jardín de Microcosmos, el museo del CERN. En la fotografía se pueden apreciar sus dimensiones.

El siguiente símil puede ayudarnos a entender el fenómeno. Imaginemos tres bolas de billar en una mesa, de colores rojo, verde y azul. Una bola blanca puede, en principio, ser golpeada con el taco y colisionar de manera perfectamente elástica con cualquiera de las otras tres. Ahora, consideremos que las tres bolas de color están ligadas unas a otras por muelles, en cuyo caso parte de la energía transferida durante la colisión se invertirá en deformar los muelles y el proceso no sería elástico. Las bolas de color jugarían el papel de los quarks y los muelles representarían la ligadura ejercida por los gluones que, en principio, es tan intensa que los quarks no pueden separarse los unos de los otros, en ningún caso, más allá del diámetro medio de un nucleón. Siguiendo con el símil del billar, el único modo de que la colisión con la bola blanca, que representaría al electrón, resulte elástica sería que los muelles permanecieran relajados, sin ejercer fuerza alguna, cuando las bolas se hallaran muy próximas unas respecto de otras, a las distancias típicas que las situarían dentro de la región que representaría el nucleón. En cambio, cuando la separación aumenta, los muelles deberían tensarse y ejercer una atracción intensa que impediría que las distancias excedieran las típicas del nucleón. ¿Es este el comportamiento que la QCD decreta para la interacción por intercambio de gluones?

## LA PRISIÓN DE LOS QUARKS

La fuerza fuerte entre quarks mediada por ocho clases distintas de gluones, que transportan la carga de color tal como dicta la QCD, presenta, efectivamente, un comportamiento muy diferente a la fuerza electromagnética entre esos mismos quarks, mediada por fotones de una única naturaleza. La razón de esa diferencia se halla en una propiedad que distingue crucialmente a los gluones y a los fotones. Estos últimos transportan el momento intercambiado durante la interacción electromagnética entre partículas cargadas, pero ellos mismos son bosones eléctricamente neutros, que no sienten la interacción y, por tanto, no interactúan con otros fotones. Los gluones, en cambio, trans-



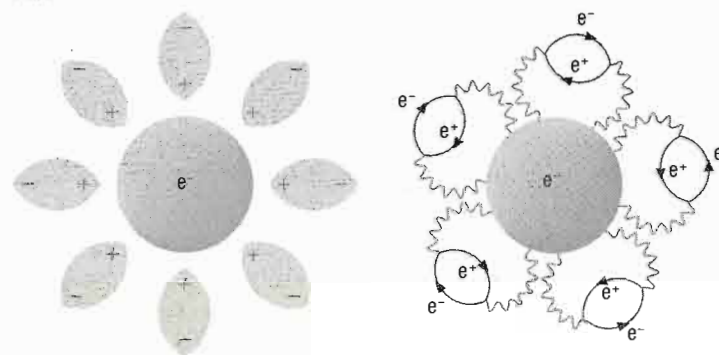
portan momento y color, sienten pues la fuerza fuerte e interactúan también los unos con los otros. El origen profundo de este comportamiento dispar es de carácter muy abstracto y técnico, radica en las diferencias entre las transformaciones de simetría asociadas a la conservación de una única carga eléctrica y de tres cargas distintas de color.

Para entender las consecuencias del carácter coloreado de los gluones, recordemos que las interacciones pueblan el vacío de excitaciones cuánticas virtuales y le confieren una estructura compleja. Como explicamos a propósito del campo electromagnético, una partícula cargada está rodeada de los fotones virtuales que emite y absorbe, los mismos fotones virtuales que propagan el campo y llevan la interacción a través del espacio. Estos, a su vez, dan lugar a pares de electrones y positrones (o de quarks y antiquarks) que generan una nube de partículas virtuales cargadas. Esta nube se extiende alrededor de cada partícula cargada, en el caso de la carga eléctrica, hasta el infinito a causa del alcance de las fuerzas electromagnéticas. De manera recursiva, cada partícula generada emite y absorbe fotones e interactúa con las demás, dando lugar a la complicada estructura del vacío que exigía el mecanismo de renormalización para el tratamiento adecuado de la teoría y la obtención de predicciones precisas y fiables. En realidad, la idea que subyace al mecanismo de renormalización es que la verdadera partícula física contiene también la nube de partículas virtuales que la rodea y, precisamente por ello, sus propiedades físicas medibles, como la masa o la carga, se refieren a ese conjunto que incluye las contribuciones infinitas, que fueron identificadas por primera vez por Felix Bloch, Arnold Nordsieck y Victor Weisskopf.

Si bien la nube de partículas virtuales posee, en su conjunto, una carga eléctrica neutra, porque estas se producen por parejas con cargas opuestas (la interacción conserva la carga), cada una de esas partículas virtuales cargadas sentirá el campo creado por la partícula que genera la nube. De ese modo, las distribuciones espaciales de carga eléctrica positiva y negativa no coincidirán exactamente, produciendo un efecto de superposición no nulo sobre el campo total que percibirá un observador. Pensemos en

un electrón. Los fotones virtuales que lo acompañan generarán parejas de electrones y positrones; los electrones serán repelidos y los positrones atraídos eléctricamente, de suerte que los primeros estarán siempre un poco más alejados del electrón físico que los últimos. Así, la carga positiva de la nube virtual estará más cerca del electrón, contribuyendo a amortiguar el efecto total del campo creado por este. El fenómeno es completamente análogo a otro clásico bien conocido que se produce cuando una carga eléctrica se rodea de un medio dieléctrico, es decir, de una sustancia material formada por moléculas cuyas cargas positivas y negativas pueden separarse lo suficiente, sin llegar a liberarse o romper la molécula. Cuando esto ocurre, el campo creado por la carga separa las cargas del medio que, a su vez, generan un campo inducido que se opone al primero, reduciendo su intensidad. Se dice que la carga polariza el medio (figura 6). Fruto de esta analogía, y del hecho de que las partículas virtuales que vehiculan el efecto son consustanciales al vacío cuántico, el fenómeno se conoce como *polarización del vacío*.

FIG. 6



Representación esquemática del fenómeno de polarización de un medio dieléctrico por una carga (izquierda). Las moléculas polarizadas que forman el medio se orientan según el campo creado por la carga libre y la rodean de la carga de polarización que apantalla el campo. La polarización del vacío en QED (derecha) es un fenómeno análogo en el que las parejas de electrones y positrones virtuales desempeñan el papel de las moléculas polarizadas del dieléctrico.



## LA SIMETRÍA QUIRAL Y LA MASA DEL UNIVERSO

Los quarks *u* y *d* resultaron tener masas muy pequeñas, de unos 2 y 5 MeV, respectivamente. De ser exactamente nulas sus masas, la teoría de las interacciones que describiría un mundo con solo esos dos quarks tendría una simetría muy especial, que recibe el nombre de *simetría quiral*. En la naturaleza, la quiralidad es la propiedad que nos dice si nos referimos a un sistema o a su imagen especular. Por ejemplo, la estructura espacial de algunos azúcares o proteínas presenta dos variantes con diferente quiralidad (en la figura 1 se representan las variantes levógira, L, y dextrógira, D, de un aminoácido, siendo cada una de ellas la imagen especular de la otra). En física, la quiralidad de las partículas se define de manera muy matemática y abstracta, pero, en el caso de partículas sin masa, equivale a las dos posibles orientaciones de su momento respecto a su espín. La simetría quiral implicaría que los dos quarks se comportan exactamente de la misma forma, cualquiera que sea su quiralidad.

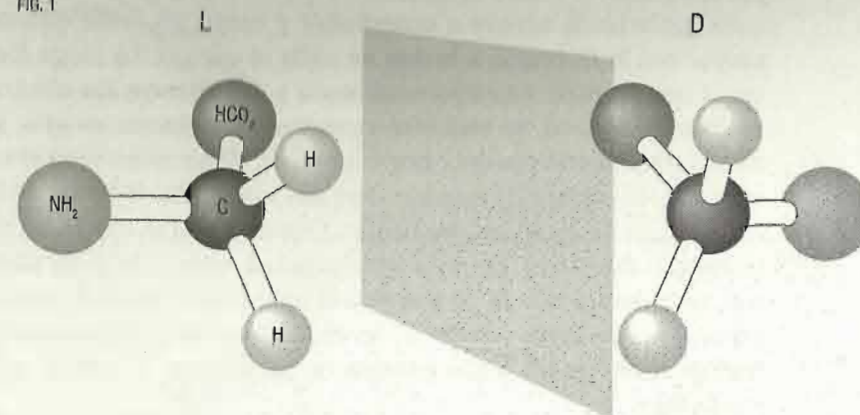
### La masa de los nucleones

Sabemos, sin embargo, que nuestro mundo, básicamente formado por esos dos quarks, no respeta la simetría quiral. La razón de ello no está en la pequeña masa de *u* y *d*, sino en la ruptura espontánea de esa simetría. De manera análoga al modo en que algunos sistemas pueden magnetizarse por orientación espontánea de sus dominios magnéticos microscópicos, la naturaleza selecciona una quiralidad. El mecanismo por el cual se establece esta selección está relacionado con la teoría de la interacción fuerte que se describe en este capítulo. El resultado es que los nucleones, formados por los quarks *u* y *d*, adquieren una masa de aproximadamente 1 000 MeV, 100 veces mayor que sus quarks constituyentes. Las interacciones originadas por la fuerza fuerte provocan que un quark inicialmente sin masa adquiera una igual a la tercera parte de un nucleón, aproximadamente. Pero, además, la pequeña masa de los quarks *u* y *d* genera una ruptura explícita de la simetría en la teoría misma que permite explicar la masa adquirida por los piones. De no haberse producido dicha ruptura explícita de la simetría quiral, las masas de los piones hubieran sido exactamente nulas. Y, en cualquier caso, al ser la ruptura muy débil, sus masas resultan ser bastante menores, casi cuatro veces, que el resto de mesones que completan con ellos el octeto.

### La distribución de materia en el universo

En el universo, la materia y la energía oscuras, conocidas únicamente por sus efectos gravitatorios y antigravitatorios, constituyen un 96% del total de la masa del universo (figura 2). Si se obvia, el 0,3% de neutrinos y los electrones, 2000 veces más ligeros que los nucleones, el 4% restante, que corresponde a la masa de las estrellas, los planetas y el gas interestelar, está formado por quarks *u* y *d*. El 99% de esa masa no proviene del mecanismo de Higgs, se explica únicamente por la ruptura espontánea de la simetría quiral. Yoichiro Nambu fue galardonado con el premio Nobel de Física en 2008, en reconocimiento a sus trabajos en pos de la comprensión de este fenómeno.

FIG. 1



Las dos variantes quirales, L y D, del aminoácido glicina.

FIG. 2

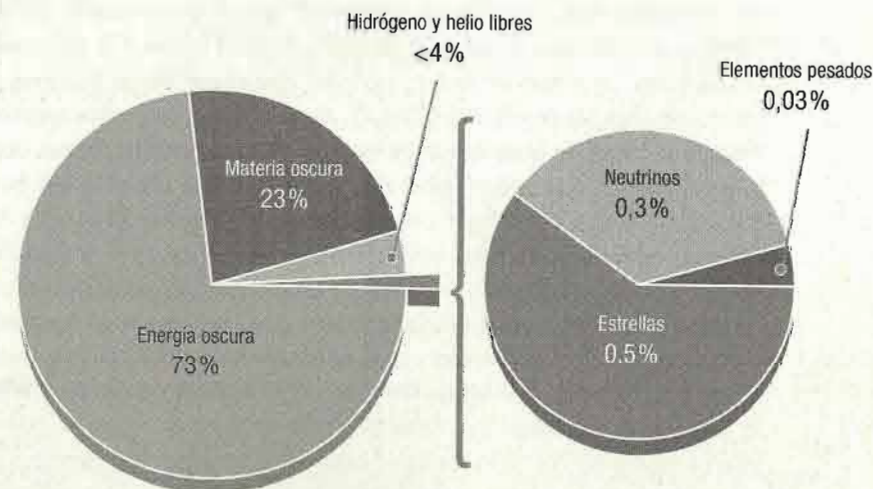
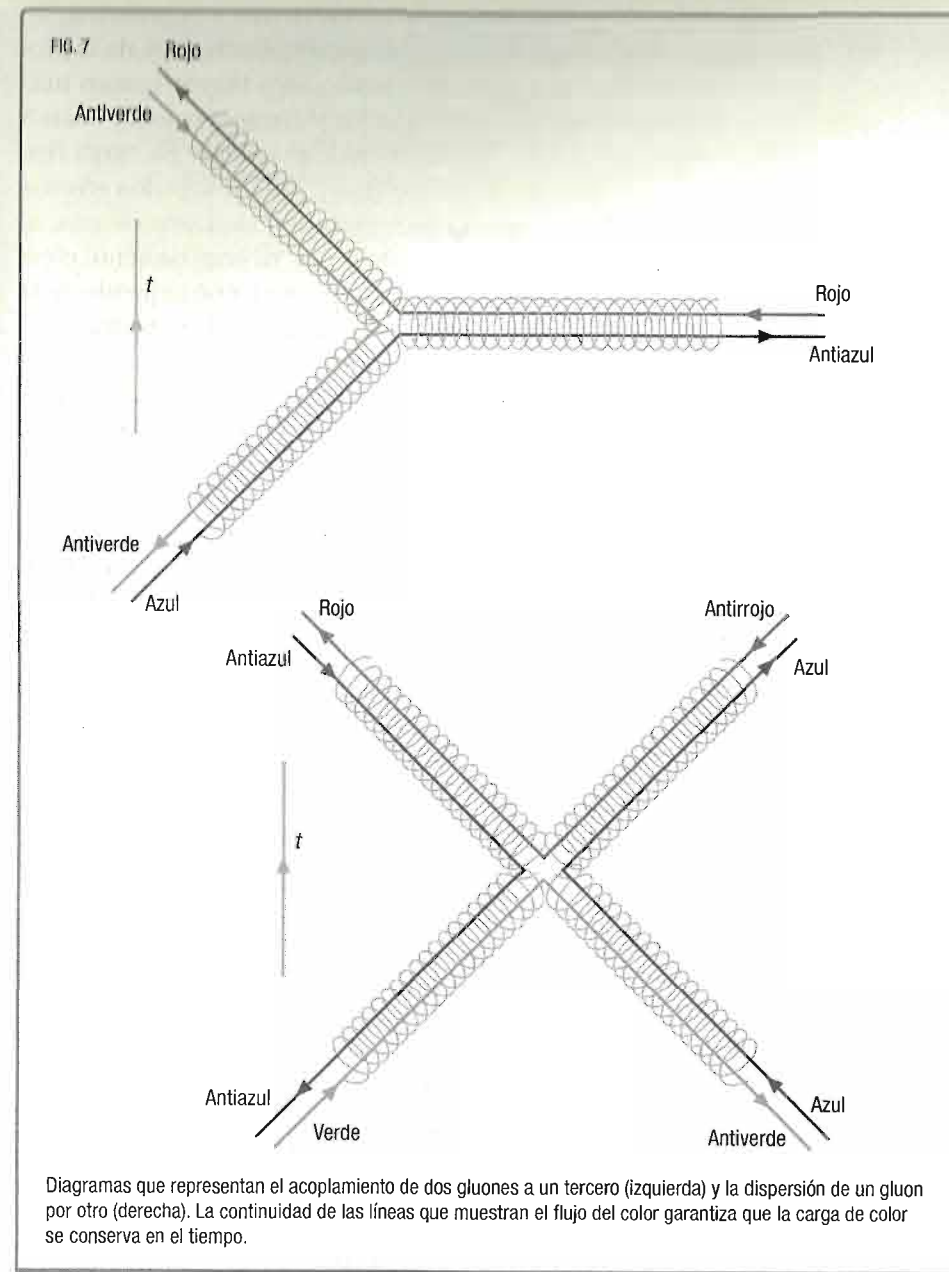


Diagrama que muestra las distintas naturalezas, teóricamente comprendidas o no, en las que se presenta la materia en nuestro universo.

La interacción electromagnética contribuye a la polarización del vacío y esta genera un efecto de «apantallamiento» de la propia interacción. Dicho apantallamiento será mayor cuanto más vacío polarizado separe a observador y carga, es decir, cuanto mayor sea la distancia a la que se mida el campo. La carga física, la que se mide experimentalmente y que incluye los efectos de la nube virtual, se reducirá cuando nos alejamos de ella, al debilitarse los efectos del campo que crea. El acoplamiento electromagnético entre un fermión cargado y un fotón depende de la carga física de aquel (es, de hecho, proporcional al cuadrado de la carga). Por tanto, no será una cantidad constante y, en cambio, se reducirá con la distancia a la que es percibido el campo creado por la carga, es decir, se reducirá cuando el momento transportado por el fotón disminuya, para llevar el campo más y más lejos.

También la interacción fuerte contribuye a la polarización del vacío, pero el efecto resultante es el opuesto. La polarización reforzará la interacción. Veamos por qué. Un quark producirá gluones virtuales que, además de parejas de quark y antiquark, generarán a su vez más gluones virtuales, debido a que los gluones, portadores de carga de color, pueden dispersar otros gluones o producir parejas de ellos (figura 7). Así, el vacío entre dos quarks físicos se llena de quarks virtuales, que amortiguan la fuerza con la que interactúan, pero también, y sobre todo, de gluones que refuerzan el transporte de color entre esos quarks. El efecto de refuerzo gluónico domina sobre el de apantallamiento originado por los quarks virtuales, y el campo de la fuerza fuerte aumenta cuando nos alejamos del quark físico que lo crea. A la inversa, cuando nos acercamos más y más al quark físico el campo tiende a desvanecerse. Así, cuando los quarks se aproximan lo suficiente unos a otros, dejan de sentir sus respectivos campos de color y se comportan como lo harían libres de la interacción fuerte. De este modo que acabamos de describir, David Gross, David Politzer y Frank Wilczek demostraron, en 1973, que la teoría cuántica basada en la simetría de color explicaba la libertad asintótica observada para los quarks en el interior del hadrón. Y por ello, en 2004, fueron galardonados con el premio Nobel de Física.





## TÉCNICAS NO PERTURBATIVAS EN CROMODINÁMICA CUÁNTICA

La necesidad de superar el enfoque perturbativo, tan fructífero para la QED como inapropiado para el tratamiento de QCD en el régimen de distancias y energías en el que se produce el fenómeno del confinamiento, ha llevado a los físicos de partículas a aplicar y desarrollar otras técnicas, generalmente denominadas *no perturbativas*. Citemos algunas de ellas.

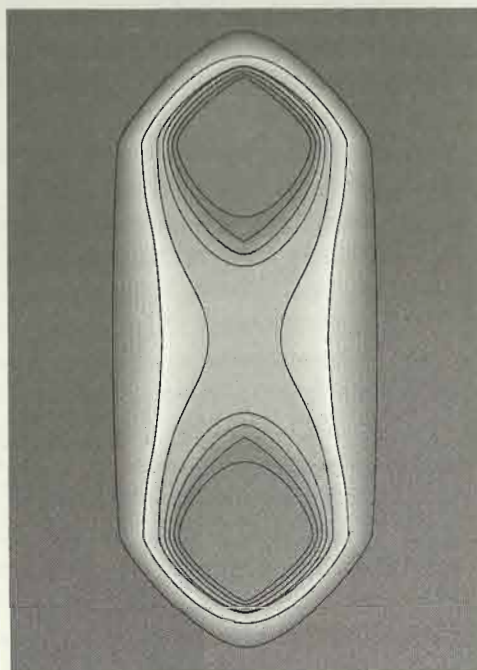
### QCD en retículo: potencial estático confinante

Esta técnica fue introducida por Kenneth Wilson en 1975. En ella se tratan todos los efectos cuánticos de una sola vez, aunque a costa de simular el espacio-tiempo físico como una malla o retículo, formado por un número discreto de puntos, con objeto de poder calcular observables. De este modo Wilson demostró, por ejemplo, que el potencial de interacción entre un quark y un antiquark, cuando todos los sabores son muy pesados, crece de manera proporcional a la distancia que los separa. Ello corresponde a las líneas de campo de color paralelas y concentradas en el tubo que se observa en la figura 1.

### Ecuaciones de Dyson-Schwinger: la ruptura espontánea de la simetría

Otras técnicas se basan en incluir, de algún modo, series infinitas de efectos cuánticos. Un ejemplo paradigmático lo proporcionan las soluciones de las llamadas *ecuaciones de Dyson-Schwinger*, introducidas por Freeman Dyson y Julian Schwinger a principios de la década de 1950. Usando esta técnica, se ha podido probar que, en efecto, la interacción fuerte puede originar el mecanismo de ruptura espontánea de la simetría quiral que explica el 99 % de la masa visible del universo (figura 2).

FIG. 1



Representación del aumento del potencial de interacción entre un quark y un antiquark infinitamente pesados. El tono representa la intensidad del campo y las curvas negras indican los tubos de flujo de color. Los resultados corresponden a un cálculo de QCD en retículo.

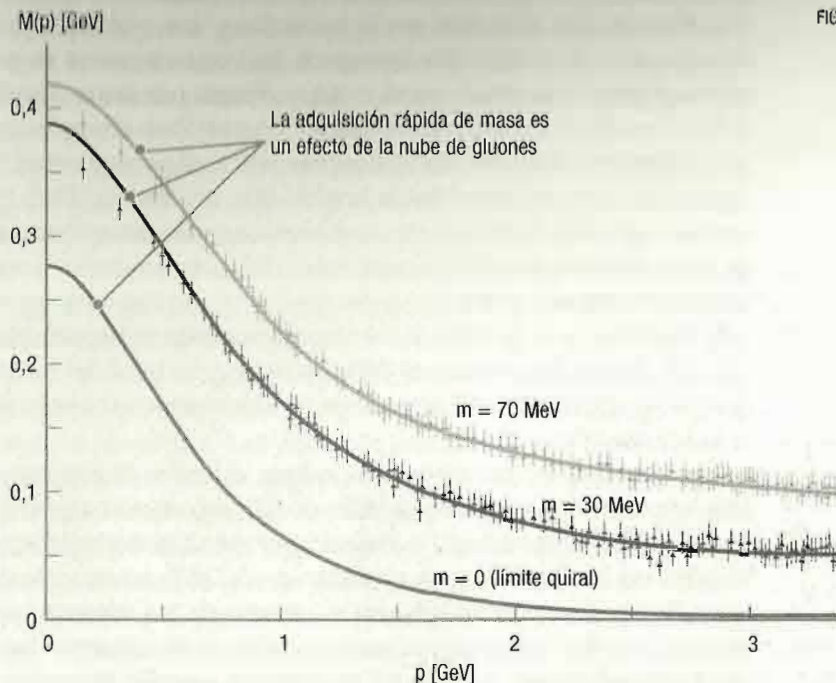


FIG. 2

En esta figura, reproducida originalmente en un artículo técnico (con resultados obtenidos por M.S. Bhagwat, M.A. Pichowsky, C.D. Roberts y P.C. Tandy en 2003), se muestra cómo un quark aislado puede tener masa nula (en la región derecha del eje de abscisas que representa el momento  $p$ , cuando el quark solo puede percibir a otros quarks que están muy cerca de él, con los que no interactúa por la libertad asintótica) y aproximadamente 300 MeV cuando, debido a su nube de gluones virtuales, puede interactuar con otros quarks situados a distancias del rango del fermi (región izquierda), a las cuales los quarks se confinan en un hadrón. El eje de ordenadas representa la masa del quark,  $M(p)$ , que depende del momento como resultado de la polarización del vacío.

### El vacío de QCD

También se han desarrollado técnicas que buscan incluir contribuciones no perturbativas en el cálculo de observables a través del vacío que incorpora los efectos cuánticos de la interacción fuerte, explotando también la estructura perturbativa de la teoría (reglas de suma) o simetrías aproximadas como la simetría quiral (teoría de perturbaciones quiral). El uso de soluciones particulares de la teoría clásica, como los llamados *instantones*, contribuye a describir la complejidad de este vacío y permite tratar también fenómenos intrínsecamente no perturbativos.

Lo que ocurre cuando los quarks constituyentes de un hadrón se alejan unos de otros no está, aún hoy, del todo claro. La experiencia nos dice que, en la naturaleza, los quarks forman estados no coloreados que llamamos hadrones y nunca se presentan libres o en estados coloreados. Viven, por tanto, ligados a otros quarks a los que, sin embargo, no perciben a muy pequeñas distancias. Cuando las distancias entre ellos aumentan, un mecanismo se desencadena e impide que se liberen. Este mecanismo recibe el nombre de *confinamiento*. Su naturaleza está determinada por la nube de partículas virtuales que rodea a cada quark y propaga el campo de la fuerza fuerte que liga a los quarks que constituyen el hadrón. Recordemos que esta nube, eléctricamente neutra, debe portar el 50% del momento total del hadrón que los experimentos de dispersión de electrones por nucleones echaban en falta.

Los detalles del mecanismo son muy difíciles de precisar y, aún hoy, siguen sin conocerse. Ello es debido, en gran medida, a que el esquema de cálculo que sirvió para realizar increíblemente precisas predicciones en el marco de la QED no es aplicable aquí. Ese esquema se basaba en el estudio de los efectos cuánticos ordenados en una serie jerarquizada por la importancia de sus contribuciones. Explicado de manera sencilla, los efectos cuánticos en QED eran más pequeños cuantos más fotones virtuales se intercambiaban, haciendo posible el enfoque perturbativo. Como se recordará, la razón radicaba en la pequeñez del acoplamiento entre materia y radiación, entre fotones y fermiones cargados. En QCD, el acoplamiento entre fermiones coloreados y gluones no es siempre pequeño. Lo es para momentos transferidos muy grandes, es decir, para interacciones a muy corta distancia (libertad asintótica). Pero no lo es para distancias de interacción del rango del fermi o mayores. Los efectos cuánticos debidos al intercambio de múltiples gluones y quarks virtuales pueden ser, en ese caso, tan importantes como los ocasionados por el intercambio de un solo gluon.

Desde los años setenta del siglo pasado y hasta la actualidad, se han aplicado y desarrollado otras técnicas de cálculo que puedan superar las limitaciones del enfoque perturbativo para la

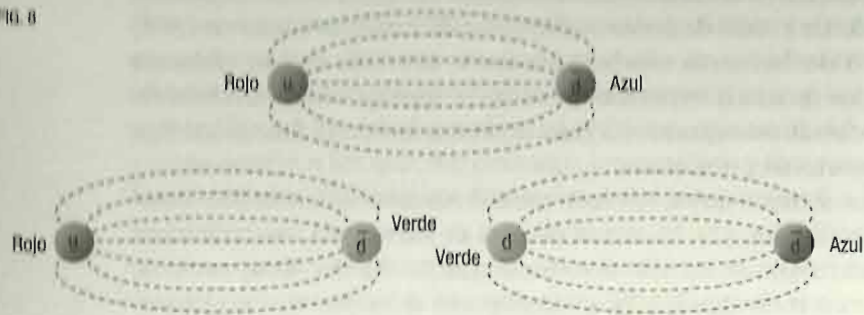
QCD. Usando dichas técnicas, aunque no exista aún una prueba detallada y definitiva del mecanismo de confinamiento en QCD, los físicos de partículas han adquirido el sólido convencimiento de que la teoría cuántica de campos basada en la simetría de color es la teoría correcta para describir la fuerza fuerte que liga a unos quarks con otros.

Una imagen que se obtiene para el fenómeno del confinamiento puede ilustrarse bien con el símil de un muelle o de una cinta elástica, que se tensan e incrementan su fuerza recuperadora. Como hemos explicado, el transporte de color se ve reforzado por los gluones virtuales y su interacción con más gluones. Cuando alejamos, por ejemplo, el quark y el antiquark que forman un mesón, se generarán más y más gluones virtuales que polarizarán el vacío y que transportarán más y más color, intensificando la atracción. Las líneas de campo electromagnético, que introdujera Faraday, se dispersan cuando dos cargas opuestas se distancian; en cambio, las de la fuerza fuerte se concentran más y más, agrupándose en una distribución en forma de tubo que suele representarse por la llamada *cuerda hadrónica*. Cuanto más separados se hallen quark y antiquark, más energía costará seguir separándolos. A distancias no mayores que el diámetro medio de un hadrón, la energía acumulada será suficiente para crear una nueva pareja de quark y antiquark que rompe la cuerda hadrónica en dos y forma dos nuevos mesones a partir del primero (figura 8). Comunicando la energía suficiente a los quarks que forman un mesón, puede crearse todo un chorro (en inglés, *jet*) de ellos, como de hecho se observa en las colisiones de partículas a altas energías.

De este modo, hemos alcanzado la etapa final, momentáneamente al menos, del viaje emprendido por los filósofos helénicos que concibieron un mundo complejo basado en unos pocos elementos sencillos. El alumno del Liceo de la Atenas clásica habría creído que la materia se estructuraba a partir de combinaciones, en distintas proporciones, de cuatro elementos básicos. Hoy sabemos que la realidad compleja que nos rodea se deriva de tres parejas de quarks y otras tres parejas formadas, cada una, por un leptón neutro y uno cargado. Todas estas partículas elementa-



FIG. 8



Líneas de campo en forma de tubo para un  $\pi^+$  ( $u\bar{d}$ ). Si se comunica suficiente energía para separar los quarks, puede crearse una pareja de quarks  $d$  y  $\bar{d}$  que rompen el tubo de líneas en dos y dan lugar a otro  $\pi^+$  y un nuevo mesón neutro.

FIG. 9

Masa	Carga	Espín	QUARKS			BOSONES GAUGE			
			$\approx 2,3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1,275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173,07 \text{ GeV}/c^2$	0	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$	
			$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0	0	
			$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	1		
			u up	c charm	t top	g gluon	H bosón de Higgs		
			$\approx 4,8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4,18 \text{ GeV}/c^2$	0	0		
			$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	0		
			$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	1		
			d down	s strange	b bottom	$\gamma$ fotón			
			$0,511 \text{ MeV}/c^2$	$105,7 \text{ MeV}/c^2$	$1,777 \text{ GeV}/c^2$	0	0		
			-1	-1	-1	0	0		
			$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	1		
			e electrón	$\mu$ muon	$\tau$ tau	Z bosón Z			
			$< 2,2 \text{ eV}/c^2$	$< 0,17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15,5 \text{ MeV}/c^2$	$\pm 1$	$\pm 1$		
			0	0	0	1	1		
			$\nu_e$ neutrino electrónico	$\nu_\mu$ neutrino muónico	$\nu_\tau$ neutrino tauónico	W bosón W			
			$1/2$	$1/2$	$1/2$				

les (figura 9) interactúan por medio de la fuerza débil, intercambiando tres tipos de bosones,  $W^+$ ,  $W^-$  y  $Z^0$ , o, si poseen carga, por medio de la fuerza electromagnética, intercambiando fotones. Solo los quarks interactúan entre sí a través de la fuerza fuerte, intercambiando gluones. Fruto de la acción de la fuerza fuerte, los quarks se presentan únicamente en forma de combinaciones de dos y tres quarks, los hadrones. De todos los hadrones, solo dos, formados por la pareja de quarks más ligera, se hallan en la naturaleza de forma estable: protón y neutrón. Con estos se obtienen todos los núcleos, estables e inestables, que podemos encontrar, y junto con el leptón cargado más ligero, el electrón, se forman todos los átomos neutros que subyacen a la materia que nos rodea y de la que nosotros mismos estamos hechos.

- ASIMOV, I., *La búsqueda de los elementos*, Barcelona, Plaza & Janés, 1983.
- BLANCO LASERNA, D., *Einstein. El espacio es una cuestión de tiempo*, Barcelona, RBA, 2012.
- : *Schrödinger. Las paradojas cuánticas*, Barcelona, RBA, 2012.
- FEYNMAN, R.P., *Electrodinámica cuántica. La extraña teoría de la luz y la materia*, Madrid, Alianza Editorial, 1989.
- : *El carácter de la ley física*, Barcelona, Tusquets, 2002.
- GELL-MANN, M., *El quark y el jaguar*, Barcelona, Tusquets, 1995.
- GREEN, B., *El universo elegante*, Barcelona, Crítica, 2006.
- HARALD, F., *Los quarks, la materia prima de nuestro universo*, Madrid, Alianza Editorial, 1994.
- LEDERMAN, L. Y TERESI, D., *La partícula divina*, Barcelona, Crítica, 2007.
- LOZANO LEYVA, M., *De Arquímedes a Einstein. Los diez experimentos más bellos de la física*, Madrid, Debate, 2005.
- WEINBERG, S., *El sueño de una teoría final*, Barcelona, Crítica, 2010.
- WILCZEK, F., *La ligereza del ser*, Barcelona, Crítica, 2009.



- abajo (*down*), quark 114, 122, 152  
 acción (magnitud física) 45, 85  
 acoplamiento 137, 146, 147, 150  
     constante de 87  
 antipartícula 33, 80, 81, 84, 89, 90, 98,  
     104, 110  
 antiprotón 81  
 antiquark 120, 122, 133, 146, 148,  
     151  
 apantallamiento 146  
 arriba (*up*), quark 114, 122  
 átomo 10, 18, 19, 21, 22, 25-32, 37-39, 44,  
     45, 47, 49-52, 55, 56, 67, 76, 85, 90,  
     114, 129, 135, 138  
  
 barión 104-109, 120, 129, 131  
 Bohr, Niels 9, 41, 44, 45  
 bosón 13, 61, 62, 96, 97, 124-126, 128,  
     131, 133, 141, 152, 153  
     de Higgs 128, 152  
 Brookhaven, laboratorio de 109, 113,  
     127  
  
 cámara de burbujas 140  
 campo 13, 23, 50, 59, 60, 69, 81, 82  
     cuántico 119, 124, 130, 148  
  
 de Faraday 82  
 de Yukawa 60, 67  
 eléctrico 26, 60, 72, 91  
 electrodébil 130  
 electromagnético 23, 24, 37, 38, 42,  
     60, 68, 71, 82, 84, 85, 86, 90, 96,  
     142, 143, 146, 151  
 gravitatorio 37, 56  
 líneas de 82  
     magnético 24, 52, 70, 72, 83, 140  
 cantidad de movimiento 45, 48, 50, 62,  
     63, 72, 73, 78, 100, 105, 131, 138  
 CERN 123, 125, 128, 139, 140  
 cima (*top*), quark 129  
 color 129-137, 141, 142, 146-148, 151  
 confinamiento 150, 151  
 corriente cargada, interacción de 125,  
     132, 139  
 corriente neutra, interacción de 125,  
     128, 139  
 cromodinámica cuántica (QCD) 131,  
     133, 134, 141, 148, 150, 151  
 cuantización 41, 44-46, 50, 67, 84-86  
 cuanto 41, 60  
 cuerda hadrónica 151  
 cuerpo negro 40, 41

débil, interacción o fuerza 12, 13, 59, 64, 67, 68, 105-107, 111, 120-122, 124, 126-128, 136, 139, 140, 153

decuplete 108, 109, 113, 114

densidad lagrangiana 86, 92

desarrollo en perturbaciones 86, 87, 90-92

desintegraciones nucleares 33

dispersión (*scattering*) 29-31, 51, 99, 100, 108, 109, 114, 120, 135, 139, 147, 150

ecuación de Schrödinger 48, 50, 51, 76, 78

efecto fotoeléctrico 41

electrodinámica cuántica (QED) 13, 68, 84, 92, 96, 122, 130, 143, 148, 150

electromagnética, interacción o fuerza 61-63, 84, 86, 87, 91, 96, 111, 119, 124, 141, 146

electromagnetismo 12, 13, 39, 40, 44, 50, 55, 59, 61, 62, 67-71, 82, 86, 91, 96, 122, 126, 128, 130

electrón 10, 22, 25, 27, 29, 32, 33, 37, 39, 41, 44-47, 49, 50-56, 58, 59, 62, 76-81, 84-90, 92, 95, 98-100, 104, 119, 121, 122, 124, 126, 129, 131, 136, 137, 139, 141, 143, 152, 153

encanto (*charm*), quark 127

energía

- cinética 76, 100
- de ligadura 73, 77

espectro electromagnético 43

espectrógrafo de masas 52

espín 53, 54, 59, 61, 78, 79, 81, 85, 95, 96, 99, 102-104, 108-110, 112, 114, 128, 129, 144

espinores 78

estado fundamental 45, 50, 51, 56, 78-80

éter 8, 71, 82

extrañeza 102-104, 107-109, 113

extraño (*strange*), quark 114, 122

Fermi, Enrico 58, 59, 105, 121, 125

fermi 52

fermión 79, 81, 89, 98, 131, 146

fondo (*bottom*), quark 129

fotón 13, 44, 45, 47, 50, 60-63, 76, 84, 86-90, 96, 128, 131, 136, 146, 152

fuerte, interacción o fuerza 12, 13, 59, 60, 61, 63, 64, 67, 68, 95, 96, 98, 100, 102, 103, 105-107, 109, 111, 112, 114, 119-121, 129-131, 133-135, 137, 139, 141, 142, 144, 146, 148-151, 153

función de onda 48, 49, 51, 78, 85, 96, 97, 131

Gargamelle, cámara 125, 139, 140

Geiger-Marsden, experimento 29, 31, 32, 38, 135, 138

gluon 13, 131-133, 139, 141, 142, 146, 147, 150-153

grupo de Lie 102, 108, 109, 124, 130

hadrón 12, 13, 100-102, 104, 107-110, 112-115, 119-122, 128, 133-135, 139, 146, 150, 151, 153

helicidad 78, 79

iones 26

isospín 102-104, 106-109, 122, 126, 130

isótopo 11, 58, 120

kaón 98, 113, 121, 122

Lamb, Willis 90

- corrimiento 90, 92

leptón 100, 105, 106, 119, 122, 124-127, 129, 136, 137, 140, 151-153

ley de las proporciones múltiples 21, 22, 41

libertad asintótica 139, 146, 149, 150

líneas espectrales 43, 44, 47

masa invariante 73

Maxwell, James Clerk 20, 23, 38, 40, 42, 50, 72, 82

- ecuaciones de 45, 72, 82, 83, 91
- leyes de 50, 70, 72

megaelectronvoltio 76

mecánica cuántica 12, 19, 31, 45, 48, 50, 51, 68, 76, 82, 90, 135, 138

mesón 60, 98, 99, 103, 105, 112, 120, 127, 151, 152

modelo

- de Bohr 39, 45-47, 67, 70
- de Dalton 21
- de quarks 122, 129, 130, 138

de Rutherford 29, 30, 31, 38, 39

de Thomson 26, 27, 29, 50, 59

del pudín de pasas 26, 27

estándar 13, 67

momento angular 44, 46, 50, 53, 59

multiplete 103, 106, 108, 109

muon 98-101, 122, 126, 127, 129, 139, 152

neutrino 33, 58, 59, 64, 76, 95, 100, 101, 104, 105, 121, 122, 124, 126, 129, 136, 139, 140, 144, 145, 152

neutrón 10-12, 33, 34, 39, 54-59, 61, 64, 95, 96, 100, 102-106, 111, 115, 119-121, 125, 126, 134, 136, 153

niveles de energía 44-46

núcleo 10-12, 31-34, 37-39, 41, 44, 48-59, 61, 73, 76, 77, 95, 96, 101, 120, 121, 125, 126, 135-137

nucleones 55-60, 63, 73, 77, 99, 100, 102, 106-108, 111, 121, 129, 136, 137, 141, 144, 150

número cuántico 44, 47, 49, 53, 95, 97, 102, 103, 107, 108, 129, 130

observador 68-73, 142, 146

- inercial 69, 70

octeto 108, 109, 113, 114, 131, 133, 144

órbitas 38, 44, 45, 47, 81

partícula

- alfa 28-32, 54, 56, 58, 136
- subnuclear 10, 12, 13, 54, 76
- subatómica 23, 25, 32, 39, 40, 53, 81
- virtual 62-64, 84, 86-88, 90, 126, 131, 134, 142, 143, 146, 150, 151

pion 12, 56, 60, 61, 63, 64, 67, 93, 96, 98, 99, 101, 104-107, 110, 112, 120, 134

Planck, Max 39-41, 46, 82

- constante de 40, 44, 47-50, 135
- ley de 40, 41, 44, 47

positrón 56

potencial 59-61, 76, 91, 148

principio

- de exclusión 70, 80, 95, 97, 129
- de indeterminación 62

protón 10-13, 32-34, 37-39, 50-59, 63, 64, 76, 85, 95, 96, 98-100, 102-104, 106-109, 111, 112, 115, 119-121, 126, 134-137, 138, 153

quark 13, 111, 113-115, 119-153

radiación

- alfa 28, 33
- beta 28, 33
- gamma 33

rayos cósmicos 98, 99, 101

reacción nuclear 32, 56, 76

relaciones de indeterminación 45, 48

renormalización 92, 142

Rutherford, Ernest 28, 31, 39, 50, 52

sabor 111, 121, 122, 125-127, 130, 136

simetría 90-92

- gauge 91
- de isospín 102, 103, 106, 107
- de sabor 111, 122, 130

singlete 108, 132, 133, 135

sistemas de referencia 68-72, 74, 75

- inerciales 69, 70, 71, 74, 75

SLAC, laboratorio 127, 135, 138

teoría

- clásica de campos 85
- cuántica de campos 13, 62, 72, 86, 96, 124, 131, 151
- de grupos 13, 68, 102, 108
- de la relatividad especial 19, 64, 68, 71, 72, 85, 90, 91, 100

transformaciones

- de Galileo 70, 74, 75
- de Lorentz 71, 72, 74, 75, 91
- gauge 91, 122, 130

Yukawa, interacción de 59, 60, 64, 121, 129, 134



# Quarks y gluones

A principios del siglo xx, los físicos descubrieron que los indivisibles átomos, postulados por los químicos, podían romperse. Y resultó que poseían un diminuto núcleo que alojaba partículas, bautizadas como protones y neutrones, las cuales conferían identidad al átomo. Hoy sabemos que los verdaderos ladrillos elementales que componen esos núcleos son partículas que se denominan quarks, y el cemento que los mantiene unidos está constituido por partículas de diferente naturaleza, denominadas gluones.

**José Rodríguez-Quintero** es profesor de Física en la Universidad de Huelva.